

REVUE BROWN BOVERI



BROWN BOVERI

13557B C

Couverture:

Les usines principales actuelles de la Société Anonyme Brown, Boveri & Cie, Baden (Suisse);
photo prise, la nuit, dans la direction Wettingen–Zurich

REVUE BROWN BOVERI

PUBLIÉE PAR LA SOCIÉTÉ ANONYME BROWN, BOVERI & CIE, BADEN (SUISSE)

TOME 54

JANVIER 1967

N° 1

La Revue Brown Boveri paraît mensuellement — La reproduction d'articles ou d'illustrations est autorisée, à la condition d'en indiquer l'origine

SOMMAIRE:

	Pages		Pages
D. EGER: Mise en service d'un dispositif de commande automatique de groupe turbo-alternateur au Canada	3	L. S. DZUNG: Méthode des valeurs moyennes dans la théorie des grilles d'aubes	37
W. JANES: La centrale à turbines à gaz de 21 MW d'Abou Zeniema, Sinaï (R.A.U.)	9	EN BREF:	
J. REDING/G. WANDL: Un nouveau dispositif électronique de commande automatique à séquences: le Secontic®	17	R. D. LAUTENSCHLAGER: Le train de laminoirs continu à petits fers de la Italsider S.p.A., Stabilimento di Piombino, Italie	44
C. G. WAHL: Réducteurs de vitesse à engrenages pour turbines industrielles Brown Boveri	30		

Mise en service d'un dispositif de commande automatique de groupe turbo-alternateur au Canada

621.165-52

Le groupe 3 de la centrale de Courtenay Bay de la New Brunswick Electric Power Commission, Canada, a été mis en service en été 1966. Il comprend une turbine de 100/110 MW, utilisant de la vapeur à 128 kg/cm² et à 538 °C, fonctionnant avec resurchauffe et qui est commandée par un dispositif électronique Turbomatic®. Dans cet article, l'auteur, D. EGER, rappelle les propriétés et la constitution de ce dispositif et rend compte des opérations de mise en service.

Propriétés du dispositif de commande automatique

Le nouveau groupe turbo-alternateur de 100/110 MW de la centrale de Courtenay Bay, Canada, est commandé par l'intermédiaire d'un dispositif électronique Turbomatic®[1, 2]¹.

Principe fondamental du Turbomatic

Le processus de démarrage se déroule par pas successifs, 19 dans le cas qui nous occupe, au cours de chacun desquels l'appareil transmet quelques ordres de manœuvres à des moteurs, vannes, tiroirs, interrupteurs.

L'état de l'installation est communiqué à l'appareil à l'aide de signaux oui ou non émis par des contacts auxiliaires, des contacts de fin de course, des thermomètres et des manomètres à contacts. Ces signaux indiquent si certaines conditions sont remplies ou non.

A chaque pas du programme, l'appareil vérifie, par l'intermédiaire d'une matrice de diodes, si les conditions nécessaires sont remplies et, dans le cas affirmatif, transmet ses ordres de manœuvres. Après réception des signaux indiquant que ces ordres ont été exécutés, l'appareil passe au pas suivant du programme. Le cycle «contrôle des conditions nécessaires – envoi d'ordres – attente des signaux d'exécution» se répète (fig. 1 et 3) à chaque pas.

Régulateur de montée en vitesse et de prise de charge

L'appareil Turbomatic est complété par ce régulateur qui agit sous le contrôle constant des indications données par des sondes thermiques sur les variations de la température dans la turbine [3].

Une calculatrice analogique détermine, à partir de ces indications, la vitesse admissible de variation de la vitesse ou de la charge. L'intégration de ces

¹ Nombres entre crochets, voir la bibliographie, p. 8.

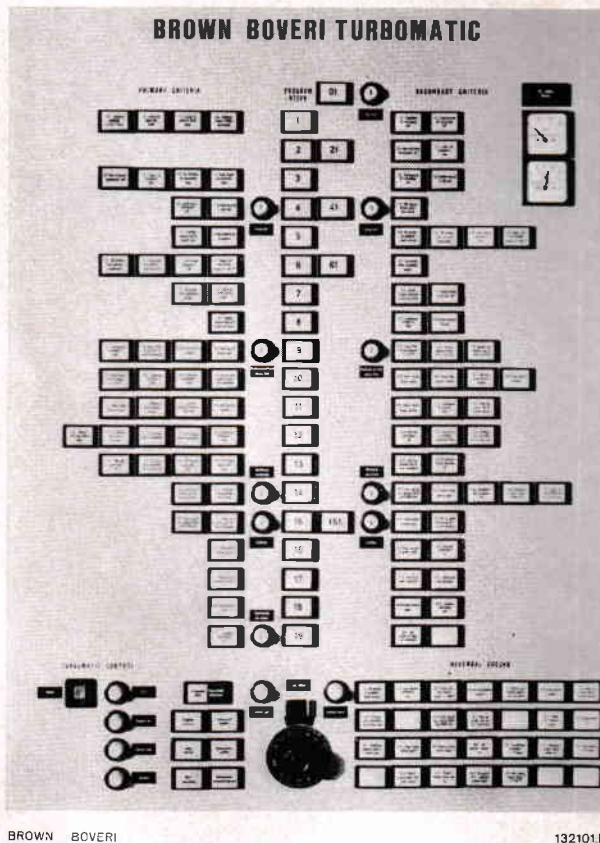


Fig. 1. — Tableau de commande et de signalisation du Turbomatic

Les voyants des pas de programme 1 à 19 et des conditions primaires et secondaires donnent au conducteur une image de l'état de la turbine au cours du démarrage.

Les ordres dépendent des conditions primaires.

Les conditions secondaires indiquent l'exécution des ordres. Les touches situées en bas, à gauche, servent à choisir l'un des genres de service: conduite automatique, commande manuelle guidée, contrôle, hors service. L'échelle du milieu sert à la fixation de la puissance désirée.

grandeurs fournit à chaque instant la valeur de consigne de la vitesse lors de la montée en vitesse ou de la charge lors de la mise en charge. Le régulateur transmet des impulsions de commande au dispositif de démarrage ou au dispositif plus vite — moins vite lors de variation de la prise de charge.

Il n'est pas nécessaire d'établir un programme de démarrage pour la machine froide et un autre pour la machine chaude, puisque le régulateur s'adapte automatiquement à l'état thermique de la turbine.

Surveillance exercée par le Turbomatic

Si tout à coup l'une des conditions importantes de fonctionnement normal n'est plus satisfaite, un pro-

gramme de régression entre automatiquement en action et ramène l'installation à un état antérieur non dangereux ou provoque l'arrêt de la turbine. S'il s'agit d'une condition d'importance secondaire, la progression du programme et l'émission de nouveaux ordres sont simplement suspendues.

Si tout va bien, dès que la charge a atteint la valeur fixée, le Turbomatic reste en fonction et son rôle se réduit à surveiller l'installation.

Différents modes d'exploitation

A côté de l'exploitation automatique dans laquelle l'installation est amenée puis maintenue automatiquement par le Turbomatic dans l'état de marche désiré, il est également possible de réaliser une « exploitation avec commande manuelle guidée ». Dans ce cas, l'état de chacune des parties surveillées de l'installation et l'état d'avancement du programme sont continuellement signalés sur le tableau du conducteur qui doit envoyer lui-même les divers ordres, au moyen du dispositif de commande manuelle normal.

Il existe en outre un état de marche dénommé « contrôle » pendant lequel le fonctionnement correct de l'appareil est vérifié pour tous les pas du programme; le Turbomatic est alors ramené de lui-même à la position correspondant à l'état de l'installation.

Dans la marche automatique, le Turbomatic commande toutes les opérations suivantes des différentes phases du programme :

Phase 1: « Virage »	huile dans les paliers, vireur automatique
Phase 2: « Condensation et réchauffage de l'eau d'alimen- tation »	huile des circuits de commande eau de refroidissement pompes d'eau condensée réchauffeurs d'eau d'alimen- tation système de vapeur de barrage extracteurs d'air purgeurs de la turbine
Phase 3: « Chauffage et mise en vitesse »	mise en vitesse jusqu'à la vitesse de synchronisme chauffage automatique des brides régulateur de tension
Phase 4: « Excitation »	convertisseur d'excitation interrupteur d'excitation préparation du poste à haute tension

Phase 5: synchroniseur
 «Synchronisation prise de charge (potentiomètre
 et prise de charge» de consigne)

Dans l'installation qui nous occupe, l'appareil Turbomatic et le dispositif de commande manuelle normal forment un tout aussi bien en ce qui concerne le fonctionnement que l'exécution, en ce sens que:

il est possible de recourir à chaque instant à la commande manuelle normale;

les ordres émis par le Turbomatic agissent en parallèle avec les ordres de commande manuelle (tension continue de commande 125 V);

on a renoncé intentionnellement à interrompre les connexions relatives à la commande manuelle durant les périodes de fonctionnement automatique, afin qu'une intervention manuelle soit toujours possible; de plus, cela simplifiait l'appareillage;

toutes les signalisations se font en courant continu à 125 V; tous les câbles de commande et de signalisation sont ainsi isolés pour un même niveau de tension; à part les câbles de connexion des couples thermoélectriques (par exemple les sondes thermiques) et des indicateurs de vibration et d'excentricité, il n'est pas nécessaire d'utiliser, pour le Turbomatic, des câbles spécialement blindés.

Montage et mise en service

L'équipement électronique du Turbomatic a été livré au milieu de janvier 1966 et l'on a pu commencer immédiatement de l'installer. Il avait d'ailleurs subi des essais complets dans notre usine de Baden. Des connexions provisoires ont été établies entre cet équipement (fig. 2), le tableau de commande et un pupitre simulant la turbine. Ainsi tous les organes électroniques concernant les différentes phases du programme purent être contrôlés, de même que les fonctions de surveillance (programmes de régression) indépendamment de la turbine et avant que son montage soit terminé. On put aussitôt faire des essais simulés de «commande manuelle guidée» pour permettre au conducteur de se familiariser avec ce nouveau genre de service.

La mise en service proprement dite a ensuite été très rapide. Le contrôle de tous les appareils auxiliaires montés sur la turbine a été grandement facilité par la possibilité d'exploitation en commande manuelle guidée et par le fait que l'état de tous les organes commandés est signalé sur le tableau de commande. La majeure partie du temps nécessaire de mise en service a été utilisée pour:

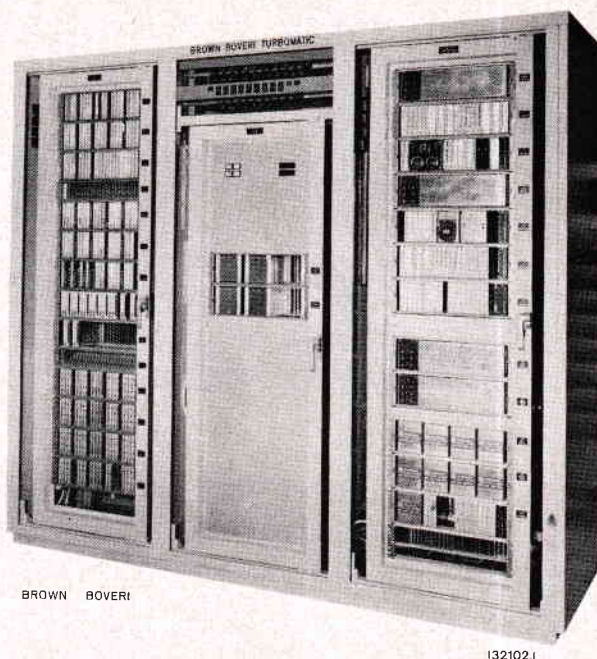


Fig. 2. — Armoire de l'appareillage électronique du Turbomatic

Les portes et panneaux de fermeture des châssis ont été enlevés. La baie de gauche concerne l'automatisme de séquence, celle de droite contient le régulateur de mise en vitesse et les amplificateurs pour couples thermoélectriques. La baie médiane contient l'appareillage des circuits d'alimentation et les relais de sortie.

l'ajustement de contacts de fin de course, de contacts auxiliaires et la vérification du fonctionnement correct,

le contrôle de toutes les connexions,

le contrôle de toutes les voies de transmission des ordres et des signalisations entre le Turbomatic et le groupe générateur.

Pendant la période de mise au point de l'installation, seuls de petits changements sans importance ont dû être opérés pour améliorer la coopération entre la machine et son appareil de commande. Malgré une étude très approfondie, on ne peut éviter, en effet, que certaines opérations se déroulent un peu autrement que ce qui était prévu, soit au point de vue de leur durée, soit au point de vue du comportement mécanique des organes. Il arrive aussi que l'on modifie un processus de commande pour le rendre plus sûr ou pour simplifier le service.

Les modifications qu'il fallut apporter au programme de démarrage se sont limitées à introduire trois nouvelles signalisations, à en supprimer deux autres, à laisser tomber un ordre, à donner la priorité à la commande manuelle du dispositif plus vite-

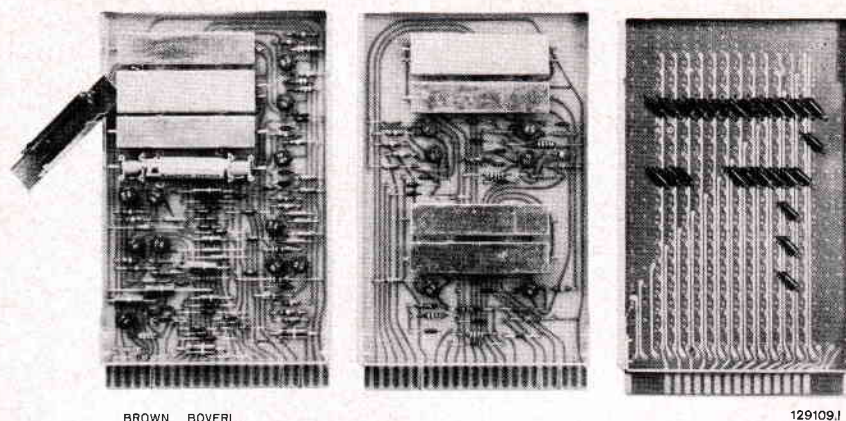


Fig. 3. — Plaquette de pas de programme, plaquette de phase de programme et matrice pour l'automatisme de séquence du Turbomatic

A chaque pas du programme correspond une plaquette. Les relais reed commandent les voyants du tableau, l'exploration des conditions, par l'intermédiaire de la matrice et permettent d'éviter qu'une défaillance d'un élément de plaquette de pas ne provoque l'envoi d'un ordre intempestif.

TABLEAU 1

23.5.66	
8.00	Chaudière sous pression, la turbine a tourné toute la nuit, entraînée par le vireur.
8.10	Commande manuelle guidée. Le tableau du Turbomatic montre déjà avant la mise en œuvre de l'automatisme si toutes les conditions sont satisfaites. On constate que l'une des signalisations de pompe à huile manque.
8.25	Contrôle: un électricien avait défait une connexion.
Jusqu'à	
9.40	Remplacement d'un relais mal monté dans la signalisation de la pression au condenseur.
10.00	Rupture de l'accouplement d'une vanne dans la station de pompage, pas d'eau de refroidissement. Réparation.
11.55	Passage à la commande par Turbomatic. Les circuits d'eau de refroidissement, de vapeur de barrage et de condensation entrent en service. Exécution de la 2 ^e phase du programme, jusqu'au 9 ^e pas.
12.20 à	
13.50	Diverses mesures sur la turbine.
13.58	Mise en service de la 3 ^e phase, marche à vide.
14.01	800 t./min. Commande manuelle d'un arrêt de la progression du programme pour exécution de diverses mesures à cette vitesse.
15.00	Montée à 1600 t./min. Nouvel arrêt de progression pour mesures des jeux et dilatations.
15.20	Au moment de la reprise de la progression, on remarque que le dispositif de montée en vitesse n'obéit pas aux ordres: moins vite. Arrêt de la progression à la main.
15.40	Une connexion interrompue a été rétablie.
15.52	3600 t./min, fin de la phase 3 du programme, pas 14, marche à vide.
16.23	Arrêt automatique par action sur la touche de régression 2 (retour au pas 9). Ouverture de la soupape casse-vide empêchée manuellement. Mesure des vitesses critiques pendant le ralentissement.
17.15	Ouverture du casse-vide. Mise en marche du vireur.

moins vite pour deux des ordres du Turbomatic et à reporter deux signalisations d'un pas du programme dans un autre.

La plupart de ces modifications ont été effectuées pendant le processus de mise en vitesse et ont exigé des interruptions de 5 à 20 minutes de la commande automatique. Le changement le plus important, qui concernait le câblage à 125 V monté sur la turbine, a occupé trois hommes pendant deux heures.

Premier démarrage à l'aide du vireur

Dès que les travaux de montage de la turbine furent assez avancés pour qu'on puisse effectuer les essais de marche avec le vireur, on a procédé à la première mise en marche commandée par la première phase du programme du Turbomatic.

L'allumage des voyants de signalisation des pompes à huile a montré que le premier pas était terminé. A la fin du deuxième pas, la pression d'huile avait atteint sa valeur normale. Le troisième pas consista dans l'arrêt de la pompe à huile de secours entraînée par un moteur à courant continu, la mise en marche du vireur et de la pompe d'envoi d'huile sous pression sous les tourillons, dans les paliers. Avant même que l'on ait eu le temps de vérifier la réception de tous les comptes rendus d'exécution et autres signalisations, l'indicateur de rotation s'est mis à tourner, le voyant «vitesse inférieure à 30 t./min» s'est éteint et le voyant d'exécution du quatrième pas s'est allumé. Ainsi, la première phase du programme était terminée.

Le programme s'est déroulé rapidement, l'appareillage automatique a fonctionné normalement, l'essai a donné entière satisfaction.

Quelques jours plus tard, la turbine a été mise en marche pour la première fois au moyen de vapeur.

TABLEAU II

Date	Démarrage n°	Opération	MW	Arrêt commandé par le Turbomatic, provoqué par:		Remarques
				Signalisation de la turbine (condition provoquant une régression du programme)	Action sur une touche d'arrêt	
23.5.66	1	1 ^{re} mise en marche, mesure des vitesses critiques	—		×	Voir tableau I
25.5.66	2	Ajustement des domaines de vitesses critiques sur le régulateur de mise en vitesse	—		×	
	3	Mesure du statisme du régulateur de vitesse. Relevé des caractéristiques à vide et en court-circuit de l'alternateur	—		×	
	4	Ajustement des dispositifs de protection de l'alternateur	—	Arrêt automatique pour l'ajustement du dispositif de protection de l'alternateur		
	5	Contrôle du statisme du régulateur, vérification des changements de programme	—			Fermeture rapide à la main pour essai, le Turbomatic suit et provoque l'arrêt automatique
26.5.66	6	Ajustement des jeux axiaux de la turbine pour la marche en charge	10		×	
	7	Ajustement du régulateur de tension	—			Fermeture rapide à la main à cause du réchauffeur 2
	8	Ajustement de la stabilité du régulateur de la charge	15	Défaut de réglage du dispositif d'alarme pour différences de dilatation		
	9	Travaux à la commande des brûleurs	30	Niveau supérieur du réchauffeur 2 (l'interrupteur vibrant à flotteur donne l'alarme à faux)		
	10	Travaux aux brûleurs	50		×	
30.5.66	11	Travaux aux brûleurs. Ajustement de la sensibilité du régulateur de la charge	40		×	
	12	Ajustement de l'extracteur d'air	60	Fausse alarme réchauffeur 2		
	13		32		×	
31.5.66	14	Contrôle du synchroniseur, mesures sur le régulateur de tension	70	Fausse alarme par le relais de protection différentielle		
	15	Commande des brûleurs 2.6 au 11.6, contrôle des paliers	76		×	
12.6.66	16	Démarrage à froid	5	Manque d'eau de refroidissement		
	17		40			Fermeture rapide à la main
14.6.66	18	Contrôle de vibrations	—		×	
	19	Ajustement de la protection contre les survitesses	5		×	
16.6.66	20		5	Survitesse pour le contrôle de la protection		
	21		—	Pression du liquide de commande		
	22	Début du régime normal	45		×	
17.6.66	23		100		×	
				Somme: 8	12	

Ce démarrage a été commandé complètement par le Turbomatic, sans intervention d'aucun ordre manuel. Le tableau I donne un extrait du procès-verbal qui le concerne.

23 mises en marche automatiques en quatre semaines

Pour familiariser rapidement le personnel avec la commande automatique et pour pouvoir observer le comportement du Turbomatic et la convenance du programme dans un nombre aussi élevé que possible de conditions d'exploitation, il avait été décidé de faire exécuter, pendant la période de mise en service, le plus de manœuvres possible à l'aide du Turbomatic. C'est pourquoi l'on a procédé, pendant les quatre semaines qui ont suivi le premier démarrage, à 23 mises en marche automatiques. Ce n'est que beaucoup plus tard qu'eut lieu la première mise en marche commandée à la main, dans le cadre de la formation du personnel de service.

Le tableau II donne un aperçu des événements qui ont marqué cette période pendant laquelle on a pu constater que chaque fois qu'un état inadmissible s'est présenté, le Turbomatic a parfaitement donné les ordres de manœuvres convenables.

Généralités sur la commande automatique

La période de mise en service de la turbine, avec tous les contrôles et mises au point nécessaires, n'a duré que huit semaines. Elle n'a donc pas été plus longue que pour un groupe sans commande automatique.

Lors de l'étude de l'appareillage et tout au long de sa construction, on a pu éviter les longues et parfois fastidieuses discussions entre spécialistes de la commande et spécialistes de l'automatisme, parce que, dans nos services d'étude, ce sont les mêmes ingénieurs qui s'occupent des deux techniques. Cela présente naturellement aussi un grand avantage pour le groupe chargé des travaux de mise en service.

L'un des principes fondamentaux de la technique Brown Boveri consiste à séparer nettement tous les organes destinés à mesurer les grandeurs d'influence, à déceler des états, à signaler des dérangements, de tout ce qui concerne la commande et l'automatisme. Cette séparation facilite beaucoup la mise en service

et l'entretien. Elle augmente aussi la disponibilité des installations, car toutes les fonctions s'exercent indépendamment les unes des autres.

Lorsqu'on entreprend une étude d'automatisation, il faut toujours commencer par une analyse très complète des opérations à réaliser. Puis, il faut s'efforcer de simplifier autant que possible les divers processus à mettre en œuvre; on augmente ainsi les chances de succès de l'automatisation et la sécurité de service. La commande de deux pompes fonctionnant à plein débit est par exemple beaucoup plus simple et peut se faire avec un plus petit nombre d'éléments que la commande de trois pompes fonctionnant aux deux tiers de leur débit normal.

Dans une centrale à vapeur, il est difficile d'empêcher l'oxydation des contacts ou de garantir l'étanchéité des boîtiers des appareils. On devrait donc toujours adopter une tension de commande suffisamment élevée (60 à 220 volts) et prévoir une conversion des signaux et une séparation des circuits à l'entrée de l'appareillage électronique, par exemple au moyen de relais reed.

Perspectives

Le Turbomatic est un dispositif de commande électronique automatique créé spécialement pour les groupes générateurs de centrales à vapeur. Mais il peut également être utilisé à un niveau supérieur comme appareil de commande automatique d'une tranche complète de centrale s'étendant de la chaudière jusqu'au transformateur. On a alors au niveau inférieur des organes de manœuvre pour les interrupteurs de moteurs, vannes, etc., et au niveau intermédiaire des ensembles de circuits de logique de groupes fonctionnels.

(P. H.)

DIETER EGER

Bibliographie

- [1] H. BLOCH: Dispositif électronique de commande automatique selon un programme fixe pour groupes générateurs à turbine à vapeur. *Rev. Brown Boveri*, t. 51 (1964), n° 3, p. 156 à 164.
- [2] A. DEHM et M. SALM: Le dispositif Turbomatic de démarrage automatique pour turbines à vapeur. *Rev. Brown Boveri*, t. 50 (1963), n° 8, p. 488 à 491.
- [3] G. PAHL, W. REITZE et M. SALM: Dispositif de surveillance des variations de température dans les turbines à vapeur. *Rev. Brown Boveri*, t. 51 (1964), n° 3, p. 165 à 175.

La centrale à turbines à gaz de 21 MW d'Abou Zeniema, Sinaï (R.A.U.)

621.311.23:621.438 (62)

La Sinaï Manganese Co., au Caire, a réalisé avec les Services officiels des mines de l'Égypte un projet d'utilisation industrielle des gisements de fer et de manganèse existant dans la péninsule du Sinaï. L'énergie électrique nécessaire sera fournie par une centrale à turbines à gaz à laquelle est adjointe une installation de distillation d'eau de mer. L'auteur de l'article, WALTER JANES, donne une description de la centrale et de l'installation de distillation dont l'étude et la construction ont été confiées à la Société Brown Boveri, en qualité d'entrepreneur général.

La centrale qui nous occupe (fig. 1) est située sur la péninsule du Sinaï, à environ 126 km au sud-est de Suez, près du petit port d'Abou Zeniema, dans le golfe de Suez. A environ 45 km de la côte, se trouvent les mines de manganèse de la Sinaï Manganese Co., dans une région montagneuse de formation sédimentaire. Le minerai contient une proportion généralement assez faible de manganèse et une assez grande quantité de fer. Jusqu'ici, ce minerai était transporté par un funiculaire et par un chemin de fer à voie étroite jusqu'à Abou Zeniema d'où il était exporté par bateaux.

Les besoins en ferromanganèse des aciéries égyptiennes d'Hérouân et les perspectives d'exportation

beaucoup plus favorables que l'on entrevoyait pour ce métal ont conduit à la réalisation d'un projet tendant à traiter industriellement le minerai à Abou Zeniema même, en vue de la production simultanée de ferromanganèse et de fer.

C'est la Sinaï Manganese Co., au Caire, qui a lancé l'idée du projet général et celui-ci a été réalisé en collaboration avec les organisations nationales d'Égypte.

Le cœur de l'installation est un four de fusion à courant triphasé absorbant une puissance d'environ 14 MVA et qui est alimenté en minerai par l'intermédiaire d'un four rotatif.

Comme il n'existait encore aucune source importante d'énergie électrique sur la péninsule, il fallait créer une centrale capable de produire la puissance nécessaire pour alimenter les installations. Etant donné sa situation et les conditions assez rudes dans lesquelles elle devait être exploitée, cette centrale devait pouvoir être conduite et entretenue par un personnel n'ayant qu'une formation très sommaire. D'autre part, les champs pétrolifères de la Compagnie orientale des pétroles d'Égypte, dont les ressources en gaz naturel ne sont pas utilisées, se

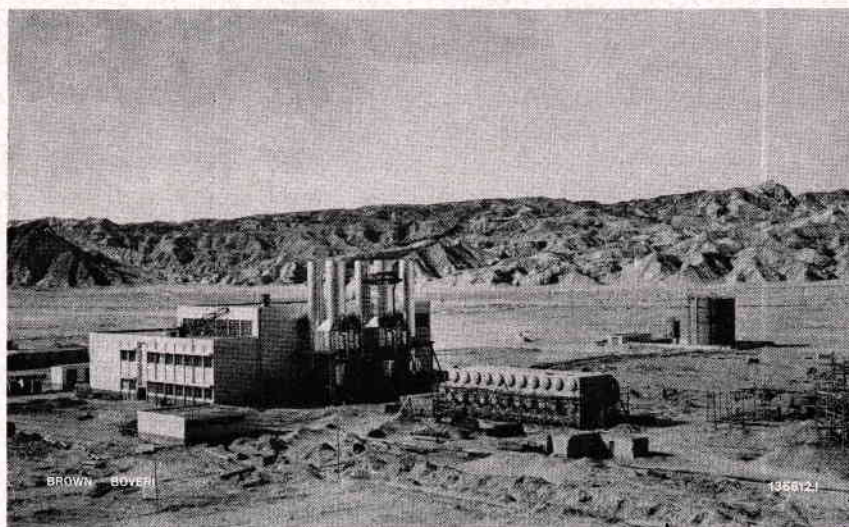


Fig. 1. — Vue générale de la centrale et de l'installation de distillation



Fig. 2. — Vue de la centrale, côté des bouches d'aspiration d'air

trouvent à quelque 50 km, à Abou Roudais. Ce sont toutes ces circonstances qui poussèrent au choix de groupes générateurs à turbines à gaz.

La centrale

La centrale qui a été construite comprend trois groupes semblables de 7 MW (fig. 2). Deux de ces groupes sont équipés de chaudières chauffées par les gaz d'échappement des turbines à gaz et pouvant participer à tour de rôle au fonctionnement de l'installation de distillation d'eau de mer associée à la centrale. La possibilité de monter par la suite deux nouveaux groupes et d'autres installations de distillation a été prévue (fig. 3).

En régime normal, deux groupes sont actuellement suffisants pour l'alimentation en énergie électrique des installations métallurgiques; le troisième groupe alimente un réseau local de distribution et constitue une réserve. Il est prévu que les installations métallurgiques fonctionneront en permanence pendant toute l'année en absorbant une puissance à peu près constante et correspondant, à la température estivale moyenne, à une valeur voisine de la pleine charge de deux groupes, pour laquelle le rendement est le meilleur. Quant à l'installation de distillation, la chaleur contenue dans les gaz d'échappement d'une turbine à gaz seule fournissant les neuf dixièmes de sa pleine puissance suffit pour lui permettre d'atteindre sa production maximale.

Les turbines à gaz consommeront normalement du gaz naturel qui sera amené à l'aide d'un gazoduc

d'une cinquantaine de kilomètres de longueur. En cas d'interruption accidentelle de l'alimentation en gaz naturel, les turbines peuvent aussi fonctionner au moyen de pétrole brut ou de mazout dont il existera toujours une certaine réserve.

Comme la centrale doit pouvoir être mise en marche sans apport d'énergie de l'extérieur, on a installé également deux groupes électrogènes de 650 kVA (540 kW) entraînés chacun par un moteur diesel rapide et qui fourniront l'énergie nécessaire pour le lancement des groupes et, en cas de besoin, pour l'alimentation des services auxiliaires les plus importants de la centrale et de l'installation métallurgique.

Conformément au désir exprimé par le client, la centrale est logée dans un bâtiment massif en béton dont la construction a été confiée à une entreprise égyptienne. L'installation de distillation et les échangeurs de chaleur ont été livrés par la maison G. & J. Weir, à Glasgow.

Les groupes générateurs

Les trois groupes installés ont les caractéristiques suivantes:

Puissance aux bornes de l'alternateur	7400 kW
Rendement global rapporté au pouvoir calorifique inférieur du combustible (gaz naturel)	19 %

Les valeurs ci-dessus sont valables pour une température de l'air ambiant de 20 °C et une pression de 1,033 kg/cm²

Température des gaz à l'entrée de la turbine	env. 620 °C
Vitesse de rotation de la turbine	3740 t./min
Puissance de l'alternateur	8750 kVA
Tension et fréquence du courant	11 kV, 50 Hz

Les groupes sont à une seule ligne d'arbres et les turbines fonctionnent en circuit ouvert, sans réchauffeur d'air (fig. 4 et 5). La disposition de la centrale est visible sur les figures 3 et 6.

La température des gaz étant relativement basse à l'entrée de la turbine, celle-ci peut fonctionner en permanence au moyen de mazout ayant une teneur en cendres de 0,3⁰/₁₀₀. Cette possibilité était nécessaire, car il était prévu dès le début que l'alimentation en gaz naturel pourrait être interrompue pendant certaines périodes et que par la suite la production du gaz pourrait diminuer. Le choix de ces conditions a en outre été guidé par la nécessité de simplifier l'entretien autant que possible.

Comme on disposait de combustible à très bas prix, aucune mesure particulière n'a été prise pour améliorer le rendement.

Les chambres de combustion des turbines sont équipées de brûleurs doubles permettant de substituer sans interruption de service l'alimentation au mazout à l'alimentation au gaz.

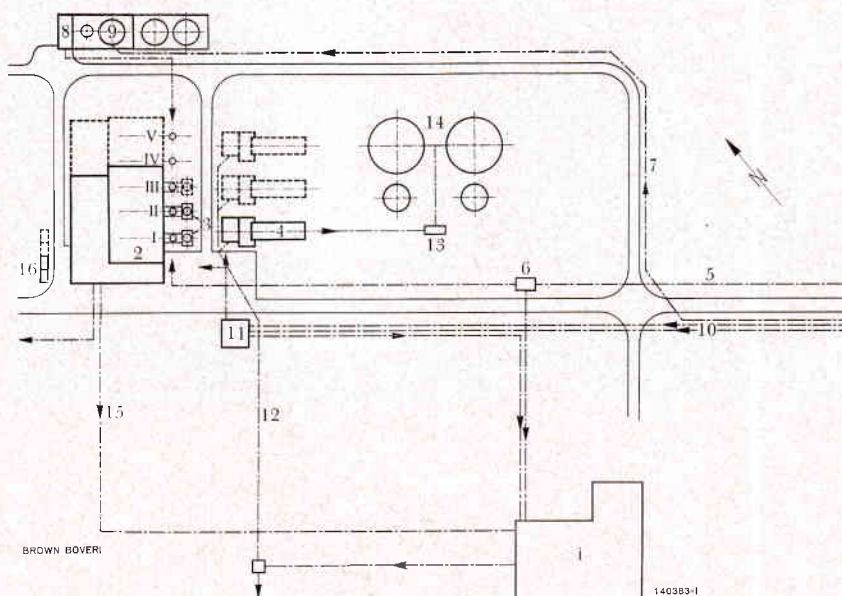
Nous pouvons admettre que la construction des groupes générateurs Brown Boveri à turbine à gaz est maintenant connue. C'est pourquoi nous nous bornerons à donner quelques renseignements spécifiques de l'installation.

Il a fallu, pour l'exécution des bouches d'aspiration d'air des compresseurs, tenir compte du fait que les tempêtes de sable sont fréquentes dans ce pays. C'est pourquoi l'air est conduit à travers des filtres secs à tambours rotatifs, à nettoyage automatique commandé par un automate manométrique.

Une installation de climatisation assure d'une part le conditionnement de l'atmosphère de la salle des machines et d'autre part une légère surpression dans toute l'installation pour empêcher la pénétration de la poussière. L'air est aspiré à l'extérieur à travers des filtres à rideaux et ressort de la salle des machines par des ouvertures à chicanes ménagées dans le toit.

Fig. 3. — Plan de la centrale d'Abou Zeniema de la Sinai Manganese Co., au Caire, et de l'installation de distillation d'eau de mer

- 1 = installation de production du ferromanganèse
- 2 = groupes générateurs à turbines à gaz
I à III = groupes installés
IV et V = groupes futurs
- 3 = chaudières de récupération de la chaleur des gaz d'échappement
- 4 = installation de distillation d'eau de mer
- 5 = conduite de gaz naturel venant des champs pétrolifères d'Abou Roudais
- 6 = station d'épuration du gaz et de réduction de pression
- 7 = conduite de combustible venant du port d'Abou Zeniema, longueur 1 km
- 8 = station de pompage du combustible
- 9 = réservoirs de combustible



- 10 = conduites d'amenée de l'eau de mer
- 11 = station de distribution de l'eau de mer et dépôt de produits chimiques pour l'installation de distillation
- 12 = conduite rejetant l'eau salée à la mer

- 13 = dispositif de mise sous pression de la distribution d'eau douce
- 14 = réservoir d'eau distillée
- 15 = câble à 11 kV alimentant l'installation de fusion
- 16 = transformateurs des services auxiliaires

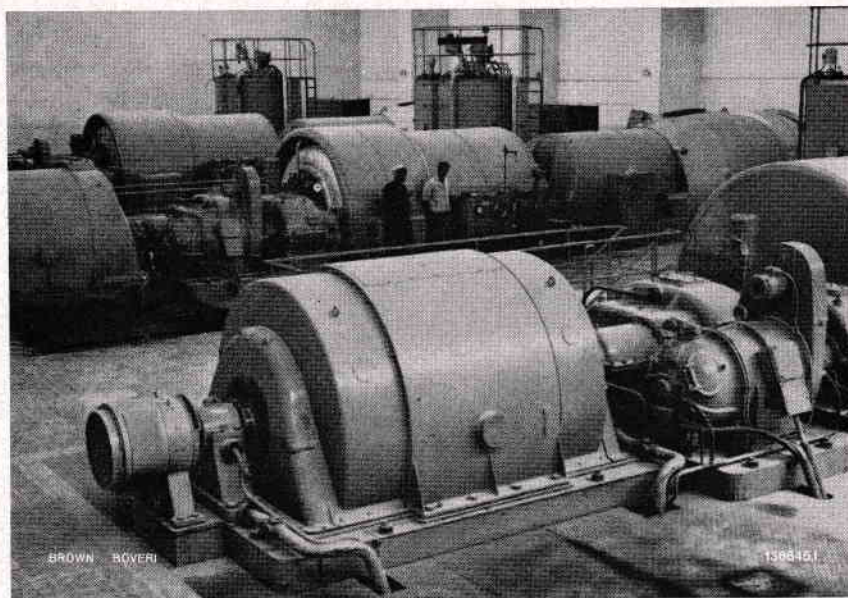


Fig. 4. — Salle des machines de la centrale, pendant le montage

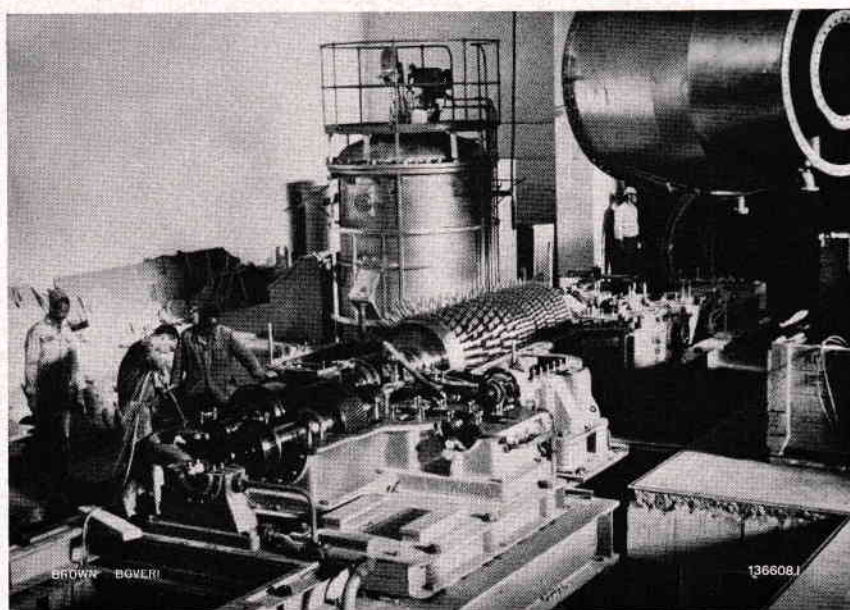


Fig. 5. — Groupe générateur à turbine à gaz en montage

On voit ici le rotor du compresseur.

A chaque turbine sont associés un système complet d'amenée de gaz naturel avec poste de réduction de pression et un groupe de pompes à mazout avec filtres branchés en série avec un réchauffeur à eau chaude. De plus, un système permet le démarrage au moyen d'huile diesel provenant d'un réservoir séparé, lorsque la centrale est arrêtée et qu'on ne dispose pas de gaz naturel. L'huile diesel est alors remplacée par le mazout dès que la production d'eau chaude par

les gaz d'échappement est suffisante pour le réchauffage du mazout.

Le lancement du groupe est assuré par un moteur triphasé à bagues dont l'accélération est réglée à l'aide d'un démarreur à résistances liquides. La mise en vitesse se fait sous le contrôle d'un système indépendant de régulation qui, dans le cas où le moteur est alimenté par le groupe électrogène, indépendamment du réseau, maintient la vitesse d'augmentation

de la charge dans les limites admissibles et le courant absorbé par le moteur, constant.

Les conduites d'aspiration d'air et la cheminée d'échappement libre sont équipées de silencieux.

Services auxiliaires de la centrale

a. Installations électriques

Le poste de la centrale comprend un jeu de barres omnibus à 11 kV, alimenté par les alternateurs, dans lequel sont montés des sectionneurs et auquel est raccordé un départ en câbles pour le four de fusion.

Une installation à 3,3 kV alimente les gros moteurs, de même que le réseau local de distribution. Cette installation peut être alimentée soit par l'intermédiaire de transformateurs auxiliaires abaissant la tension de 11 à 3,3 kV, soit par les deux groupes électrogènes de 650 kVA dont il a déjà été question. Il existe en outre une installation à basse tension pour les services auxiliaires. Les installations à 11 et à 3,3 kV se composent intégralement de matériel blindé et comprennent des cellules équipées de disjoncteurs magnétiques débouchables, c'est-à-dire d'appareils sans huile.

Le poste de commande comprend tous les appareils de mesure, de commande, de signalisation et de protection nécessaires pour la conduite de l'exploitation y compris la surveillance des principaux équipe-

ments mécaniques et thermiques, turbines à gaz, diesels, chaudières de récupération, installation de distribution de l'eau de refroidissement, etc.

b. Distribution d'eau

A l'extrémité d'une jetée se trouve une station de pompage de l'eau de mer qui est équipée de pompes à axe vertical et comprend une pompe de réserve se mettant automatiquement en marche en cas de défaillance de l'une des pompes. Pour éviter la formation d'algues dans les conduites, l'eau est additionnée d'une légère quantité de chlore. Cette station de pompage, dont les moteurs et les vannes sont télécommandés de la centrale, est reliée à la centrale par deux conduites parallèles, en fibrociment, de 1100 m de longueur (fig. 7).

Une partie de l'eau de mer destinée à l'installation de distillation passe dans un circuit en dérivation et est utilisée pour refroidir l'huile de graissage des machines, l'air de refroidissement des alternateurs et les groupes électrogènes. Du poste de distribution d'eau de la centrale part également un circuit destiné au refroidissement de l'installation métallurgique.

L'eau de mer pénètre dans l'installation de distillation par l'intermédiaire d'un bac mélangeur dans lequel l'eau est portée à une température maintenue constante par réintroduction dans le circuit d'une partie de l'eau salée sortant de l'installation.

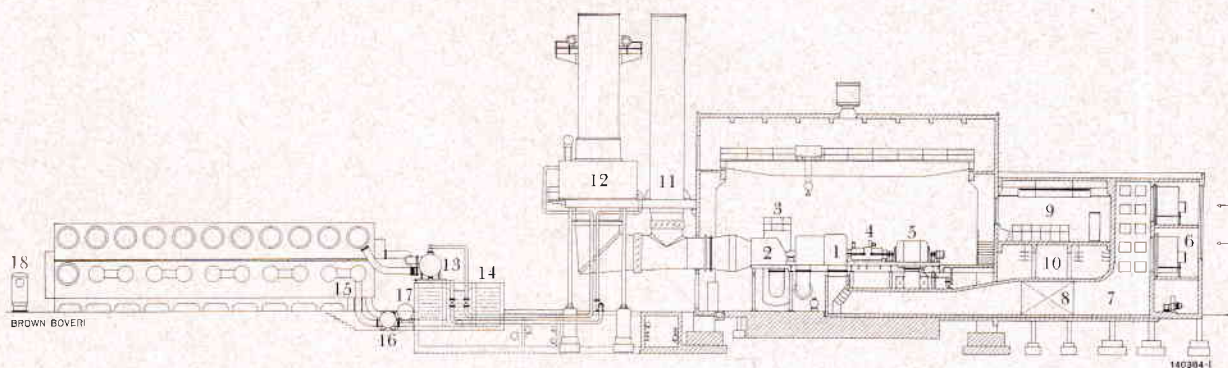


Fig. 6. - Coupe schématique de la centrale et de l'installation de distillation

- | | | |
|------------------------------|-------------------------------------|---|
| 1 = compresseur d'air | 8 = silencieux | 15 = installation de distillation |
| 2 = turbine à gaz | 9 = salle de commande | 16 = pompe de circulation d'eau de mer |
| 3 = chambre de combustion | 10 = galeries de passage des câbles | 17 = pompe à saumure |
| 4 = réducteur à engrenages | 11 = cheminée d'échappement libre | 18 = installation de traitement d'eau douce |
| 5 = alternateur | 12 = chaudière de récupération | |
| 6 = filtres d'air | 13 = réchauffeur d'eau de mer | |
| 7 = canal d'aspiration d'air | 14 = bac mélangeur d'eau de mer | |

c. Alimentation en combustible

Le gazoduc amenant le gaz naturel aboutit à un poste contenant l'ensemble des appareils destinés à l'épuration, à la déshydratation et au comptage.

Pour les combustibles liquides, il existe actuellement un réservoir principal de 1100 m³ pour le mazout et un petit réservoir pour l'huile diesel. D'autres réservoirs seront installés plus tard. Ces combustibles sont amenés soit par wagons-citernes, soit par pétroliers. Pour ces derniers, une conduite relie directement la jetée aux réservoirs. Il existe en outre un réservoir pour la consommation journalière qui alimente directement les pompes d'injection des chambres de combustion des turbines. Le remplissage du réservoir journalier est assuré par des pompes de transfert qui se mettent automatiquement en marche dès que c'est nécessaire.

Installation de distillation

Les caractéristiques principales de cette installation qui utilise la chaleur contenue dans les gaz d'échappement des turbines sont:

- Chaudière de récupération:

Débit des gaz d'échappement	env. 82 kg/s
Température de ces gaz à pleine charge	env. 345 °C
Température de l'eau venant de la chaudière	env. 121 °C
Débit d'eau chaude	env. 320 t/h
Production de vapeur pour les éjecteurs	env. 5,2 t/h
- Evaporateur d'eau de mer:

Production journalière d'eau distillée	2275 m ³
Degré de pureté de l'eau distillée	0,05 ‰
Chiffre de production	9,85 lb/1000 Btu
Température d'entrée de l'eau de mer	38,6 °C
Température max. de la saumure	90 °C
Puissance électrique max. absorbée	500 kW

La figure 6 montre une coupe schématique de l'installation et la figure 9 en donne un schéma simplifié.

a. Echanges et transmission de chaleur

Le fluide qui a été choisi pour servir de véhicule à la chaleur est l'eau chaude sous pression, car la vaporisation directe de l'eau de mer dans la chau-

dière de récupération au moyen des gaz d'échappement dont la température est relativement élevée aurait provoqué des incrustations dans les tubes. A côté du système d'eau chaude, chaque échangeur de chaleur comprend un évaporateur qui, à partir d'eau prélevée dans l'installation de distillation, produit de la vapeur pour les éjecteurs à vapeur.

La production d'eau distillée avait été fixée. En réalité la quantité de chaleur contenue dans les gaz d'échappement aurait permis d'obtenir une production beaucoup plus élevée; il aurait suffi d'agrandir les échangeurs de chaleur. Mais cela n'a pas été jugé utile et l'on n'utilise ainsi qu'une partie de la chaleur des gaz. D'autre part, on avait tenu à ce que la chute de pression dans les échangeurs soit faible afin que la puissance de type des machines soit utilisée le mieux possible.

Une partie de l'eau distillée est distribuée comme eau potable après avoir reçu les additifs minéraux nécessaires. Le reste est utilisé tel quel comme eau industrielle et pour l'irrigation des cultures prévues.

Pour que l'installation de production d'énergie électrique puisse fonctionner indépendamment de l'installation de distillation, un système de vannes télécommandées et placées à la sortie de chaque turbine permet d'envoyer les gaz chauds dans l'échangeur de chaleur ou directement dans l'atmosphère à travers une cheminée (fig. 8).

Toutes les parois du circuit des gaz d'échappement ont été dimensionnées assez largement pour pouvoir supporter les brusques augmentations de pression qui pourraient résulter d'allumages de gaz combustibles résiduels. Des manchons élastiques, des joints flexibles et des supports mobiles ont été prévus pour permettre des dilatations.

Les échangeurs de chaleur sont constitués de tubes à ailettes en fonte. Un réservoir-tampon maintient dans le circuit d'eau chaude une pression suffisante pour éviter la formation de vapeur. Les pompes de circulation et d'alimentation ont été disposées sous les échangeurs de chaleur où se trouvent également les tableaux portant les appareils de commande et de surveillance de cette partie de l'installation.

b. Evaporateur d'eau de mer

Une partie seulement de l'eau de mer passant dans l'évaporateur est transformée en vapeur sous une faible pression et à basse température de sorte qu'il ne se produit pour ainsi dire pas de dépôt de sel (fig. 9). Le reste, dont la concentration en sel a légè-



Fig. 7. — Première conduite d'amenée d'eau de mer

rement augmenté, est renvoyé à la mer. Une petite fraction de cette saumure est réintroduite dans le circuit, dans le bac mélangeur, afin de maintenir constante la température de l'eau de mer à l'entrée de l'installation. La chute de température de l'eau chaude, qui se refroidit de 91 à 43,3 °C, est répartie entre les différentes chambres d'évaporation.

Le circuit de l'eau de mer commence par le bac mélangeur. L'eau prise dans ce bac est refoulée dans l'évaporateur, sous une température constante, par la pompe de circulation. Elle passe tout d'abord dans les tubes de condensation des chambres d'évaporation où la vapeur lui abandonne sa chaleur de condensation. Ainsi, la chaleur nécessaire pour la transformation en vapeur est récupérée en grande partie.

Après ce premier réchauffage, l'eau de mer passe dans un échangeur dans lequel elle absorbe la chaleur que lui fournit l'eau chaude venant de la chaudière de récupération de la chaleur des gaz d'échappement. Puis elle est renvoyée dans les chambres d'évaporation. Elle circule là, en sens contraire, dans le canal que forme le fond de ces chambres; la surface libre de l'eau est réglée par des chicanes formant déversoirs et la vapeur s'en dégage spontanément en raison de la dépression créée par des éjecteurs. Cette vapeur, libérée par des dispositifs appropriés des gouttelettes d'eau qu'elle pourrait entraîner, vient ensuite se condenser sur les tubes parcourus par l'eau de mer non encore réchauffée et disposés à la partie supérieure des chambres et l'eau distillée retombe dans le collecteur situé au-dessous. Les pompes de

circulation de l'installation sont entraînées par des moteurs électriques.

Un système électropneumatique de commande et de régulation assure la marche et la surveillance

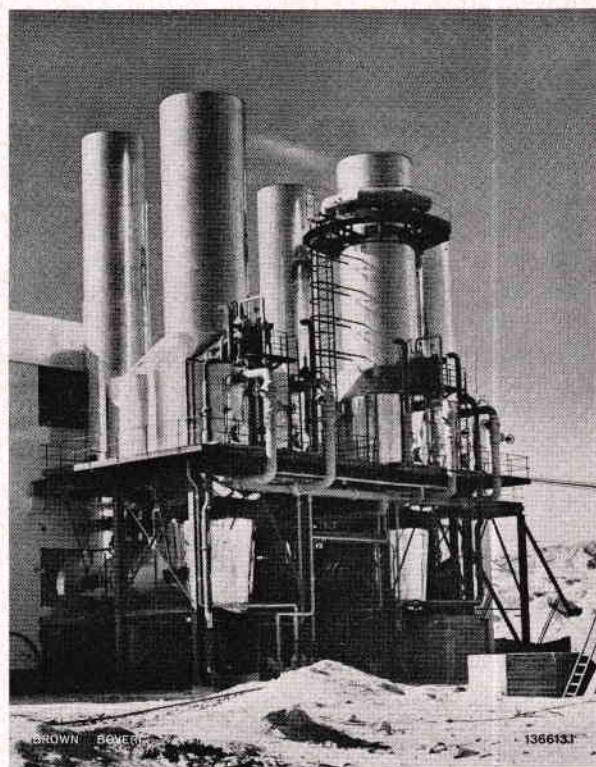


Fig. 8. — Chaudière de récupération de la chaleur des gaz d'échappement

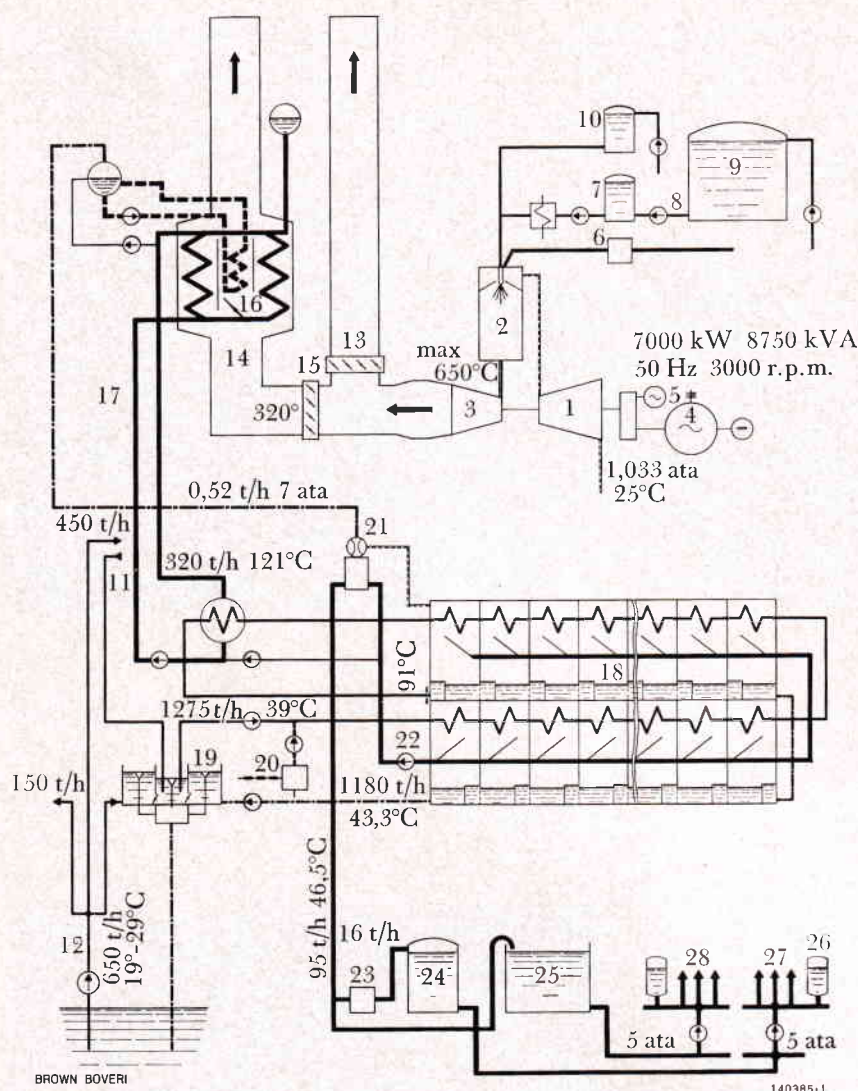


Fig. 9. — Schéma simplifié de l'installation de production d'énergie électrique et de distillation

- 1 = compresseur d'air
- 2 = chambre de combustion
- 3 = turbine à gaz
- 4 = alternateur
- 5 = moteur de lancement
- 6 = épuration du gaz
- 7 = réservoir de consommation journalière
- 8 = pompes
- 9 = réservoir de mazout
- 10 = réservoir d'huile diesel
- 11 = eau de refroidissement pour la centrale
- 12 = pompe à eau de mer
- 13 = cheminée d'échappement libre
- 14 = chaudière de récupération
- 15 = vannes
- 16 = système de production de vapeur
- 17 = circuit d'eau chaude
- 18 = installation de distillation
- 19 = bac mélangeur d'eau de mer
- 20 = dispositif de dosage d'additif
- 21 = éjecteur à vapeur
- 22 = pompe à eau distillée
- 23 = installation de traitement de l'eau potable
- 24 = réservoir d'eau potable
- 25 = réservoir d'eau non potable
- 26 = réservoir tampon sous pression
- 27 = distribution d'eau potable
- 28 = distribution d'eau non potable

pratiquement automatiques de l'installation dont le service est ainsi extrêmement simple.

Il est essentiel, dans une installation de ce genre, que l'on évite tout dépôt de sel dans l'évaporateur. Ce danger a été écarté par divers moyens, notamment les suivants :

On maintient dans tous les tubes parcourus par l'eau de mer une pression telle que la formation de vapeur soit exclue et qu'il ne puisse se produire ni dépôt de carbonate de calcium, ni dépôt d'hydroxyde de magnésium.

La température et la concentration de l'eau de mer qui s'évapore sont maintenues suffisamment faibles pour éviter tout dépôt de sulfate de calcium.

Un additif inhibiteur est introduit en très faible quantité dans l'eau de mer, à l'entrée du circuit, par un dispositif de dosage, pour éviter tout dépôt de sel.

L'eau distillée est accumulée dans de grands réservoirs en béton pour être ensuite distribuée sous pression.

(P. H.)

WALTER JANES

Un nouveau dispositif électronique de commande automatique à séquences : le Secontic[®]

621-523.8

Ce dispositif, travaillant suivant un programme qu'il est facile d'établir et de modifier, est composé d'éléments électroniques normalisés Brown Boveri. Il a été mis au point pour la commande et la surveillance d'installations diverses telles que des groupes convertisseurs, des stations de pompage, des groupes générateurs d'énergie électrique avec turbine à vapeur ou à gaz, etc. Les auteurs de l'article, J. REDING et G. WANDL, décrivent sa structure et son fonctionnement, puis donnent des renseignements sur un exemple d'application.

Tâches pouvant être assurées par le Secontic

Pendant longtemps, lorsqu'on désirait automatiser un processus industriel, on ne disposait que d'éléments mécaniques traditionnels tels que des relais, des sélecteurs ou des combinateurs. Mais avec le temps, les installations sont devenues plus importantes et compliquées et il a fallu chercher des appareils de commande offrant des possibilités beaucoup plus larges. C'est pourquoi l'on a fait appel à la technique électronique dont le développement a d'ailleurs été favorisé par les progrès réalisés dans l'emploi des semiconducteurs qui permettent des solutions économiques.

A côté du fait important qu'un équipement électronique de commande automatique peut être construit sous un volume relativement réduit, l'utilisation d'éléments électroniques fonctionnant très rapidement, sans usure, de manière sûre et n'exigeant pour ainsi dire aucun entretien présente de nombreux avantages techniques; elle augmente ainsi la sécurité d'exploitation et décharge le personnel de service de bien des tâches auxiliaires.

Le dispositif électronique de commande et de surveillance automatiques Secontic est construit à l'aide d'éléments normalisés de la technique électronique Brown Boveri. Il est conçu de manière que l'inscription du programme est extrêmement facile, que ce programme peut en tout temps être modifié ou complété sans aucune difficulté. Il peut être utilisé soit pour un processus de durée limitée,

soit pour un service permanent et assure alors la surveillance continue du fonctionnement de l'installation commandée. Dans le premier cas, la tâche du dispositif consiste dans la commande et la surveillance d'une séquence d'opérations comprenant par exemple le démarrage d'un groupe, la montée en vitesse, la prise de charge et l'arrêt éventuel. Si une perturbation apparaît au cours de l'exécution du programme, le Secontic provoque automatiquement les mesures nécessaires pour ramener l'installation ou la partie intéressée de l'installation dans un état ne présentant pas de danger ou même pour l'arrêter complètement s'il s'agit d'un dérangement grave.

Lorsqu'on doit satisfaire à de très grandes exigences au point de vue de la sécurité d'exploitation, le Secontic continue à exercer la surveillance de l'installation après les opérations de démarrage et reste constamment prêt à intervenir et à déclencher les mesures appropriées en cas de besoin.

On constate donc que le dispositif automatique Secontic assume les tâches du personnel de service en ce qui concerne la commande et la surveillance de l'installation. Il peut être appliqué notamment pour les groupes générateurs d'énergie électrique, dans les centrales hydrauliques aussi bien que thermiques [5, 6]¹ et nucléaires, pour les groupes convertisseurs, pour les stations de pompage, pour les installations de l'industrie chimique, des usines de traitement des matières premières, etc.

Mode de fonctionnement

Le Secontic réalise un automatisme à séquences en émettant les ordres de commande qui provoquent une suite d'opérations selon un programme et en surveillant les temps impartis pour l'exécution des ordres, en même temps que les états successifs de l'installation. L'appareillage qui le compose est réparti en trois ensembles principaux: le bloc de commande, le bloc de surveillance et le bloc central.

¹ Nombres entre crochets, voir la bibliographie, p. 29.

Ces informations rendent compte de la bonne exécution des ordres de commande donnés antérieurement et renseignent sur l'état momentané de l'installation. Par l'intermédiaire d'un distributeur à barres croisées (fig. 2) dénommé matrice, ces informations sont transmises, conformément au programme, aux petits ensembles d'éléments électroniques correspondant à chaque pas du programme, ensembles que nous appellerons «unités de pas». Lorsque toutes les conditions nécessaires pour l'exécution d'un pas de programme sont remplies, l'unité de pas en cause est mise en action après un délai qui peut être réglé individuellement pour chaque pas. Ce délai d'attente est choisi de manière que tous les phénomènes transitoires tels que rebondissements de contacts, oscillations dans des circuits électriques ou hydrauliques, soient terminés; il permet en outre un échelonnement approprié des diverses opérations lors de la montée en vitesse d'un groupe de machines ou de la mise en charge de certains moteurs. Chaque unité de pas provoque la remise à l'état initial de l'unité précédente, prépare le déblocage de l'unité de pas suivante, contrôle toutes les informations importantes par l'intermédiaire d'une matrice de surveillance, puis émet un ou plusieurs ordres destinés soit à des organes de commande de groupes fonctionnels [1], soit directement aux appareils de manœuvre de l'installation. Ces signaux sont transmis par les organes de sortie qui les convertissent en signaux de tension continue ou alternative de valeur appropriée. On fait une distinction entre les signaux de commande qui ont une durée bien déterminée et les signaux permanents qui ne sont interrompus qu'au moment de la signalisation de l'exécution de l'ordre. L'appareil peut d'ailleurs émettre simultanément des signaux des deux genres.

Les signalisations d'exécution des ordres sont reçues par l'intermédiaire d'une matrice de progression du programme (fig. 1 et 2) qui provoque le passage au pas suivant, dès qu'elles sont toutes arrivées. Comme un pas quelconque ne peut débiter qu'après achèvement du précédent, on obtient une chaîne d'unités de pas qui sont mises en action à tour de rôle. Si une même installation peut être commandée suivant plusieurs programmes, les pas qui ne sont pas nécessaires pour le programme choisi sont simplement sautés, c'est-à-dire que les ordres correspondants ne sont pas émis.

Nous avons représenté sur la figure 3 les cinq premières unités de pas d'un équipement automatique permettant de réaliser un grand nombre de programmes dont trois sont montrés. Dans le programme I, le pas 2 reste sans effet et le pas 3 est mis en action après le pas 1 indépendamment du fait que les conditions de passage du pas 2 au pas 3

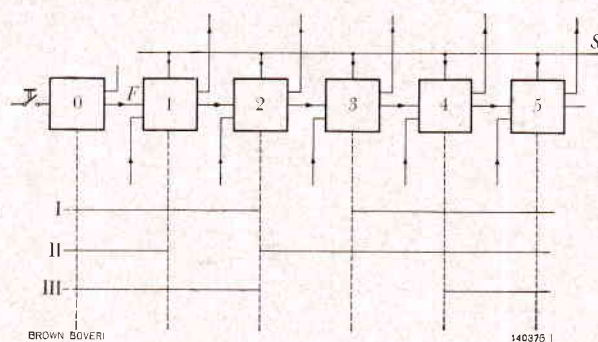


Fig. 3. — Choix des pas appartenant à divers programmes

Le programme I comprend les pas 1, 3, 4 et 5; le pas 2 est sauté, c'est-à-dire que les ordres et les signalisations qui le concernent ne sont respectivement ni donnés ni attendus. Les programmes II et III comprennent respectivement les pas 2, 3, 4, 5 et 1, 4, 5.

sont remplies ou non. En revanche, les conditions de progression du pas 3 doivent être satisfaites pour le passage au pas 4. Il se produit donc un saut S du pas 1 au pas 3 qui a été fixé sur la matrice de programme et est mis en œuvre par les entrées S des unités de pas. Le saut peut d'ailleurs s'étendre à plus d'un pas, comme dans le programme III. Si l'on a affaire à un petit nombre de programmes simples et homogènes, on utilise de préférence des aiguillages de programme, comme nous le verrons plus loin.

Chaque programme comprend nécessairement un pas 0 au cours duquel s'opère un contrôle ayant pour but de s'assurer que les différentes unités de pas sont bien dans leur état initial. Si ce contrôle montre que ce n'est pas le cas, c'est qu'il y a eu un dérangement de l'appareillage électronique, qui est signalé par un voyant et qui doit être éliminé. Si l'on opère un changement de programme avant qu'une séquence ne soit complètement terminée, toutes les unités de pas sont tout d'abord ramenées à leur état initial. Mais l'installation, elle, reste dans l'état qui avait été atteint. Au moment où le nouveau programme est mis en action, l'unité de pas 0 vérifie, d'une part, si toutes les unités suivantes sont bien dans leur état initial et, d'autre part, si les conditions nécessaires pour le passage au pas suivant sont remplies. Pour chacun des pas suivants, l'émission des ordres ne peut se faire que si les signalisations montrent que les ordres que devrait donner l'unité en cause n'ont pas encore été exécutés. Dans le cas contraire, le passage au pas suivant se fait immédiatement, sans temps d'attente.

Dans les installations où la commande manuelle est également possible, la commande automatique peut être mise en œuvre à un instant quelconque de

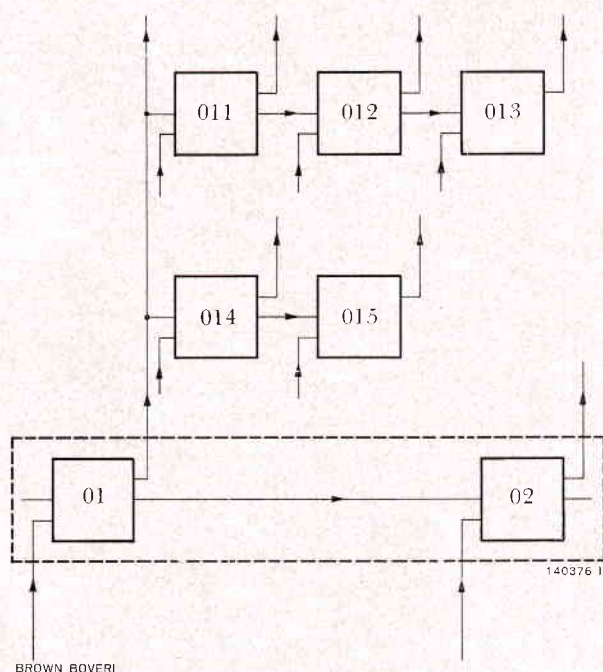


Fig. 4. — Commande d'un dispositif de commande secondaire par les unités de pas de l'équipement principal

01, 02, ... unités de pas de l'équipement principal
011 à 015 unités de pas des équipements secondaires

L'unité de pas 01 émet un ordre qui provoque la mise en œuvre de deux sous-séquences séparées, 011 à 013 et 014, 015. Ainsi, deux ou plusieurs sous-programmes peuvent se dérouler simultanément. Les organes de manœuvre de l'installation sont mis en action par les ordres des dispositifs de commande secondaires et le passage au pas suivant de l'équipement principal ne peut se faire qu'après l'exécution de la totalité des manœuvres des sous-séquences.

la séquence, quel que soit l'état de l'installation. Pour éviter des pertes de temps, un dispositif a été prévu, lequel amène automatiquement le Secontic au stade correspondant à l'état momentané de l'installation. Un processus d'exploration détermine immédiatement le pas atteint dans le déroulement du programme et localise ainsi l'unité devant émettre le premier ordre automatique. Toutes les unités de pas précédentes sont sautées sans temps d'attente comme dans les cas de sauts déjà mentionnés.

Dans les explications données jusqu'ici, un pas ne pouvait être mis en action que si les opérations commandées dans le pas précédent étaient achevées. Mais dans certains cas où les circonstances l'exigent, ou pour des questions de temps, il arrive souvent que plusieurs groupes d'opérations doivent s'accomplir simultanément. Une unité de pas du programme principal envoie alors un ordre de commande à des appareils auxiliaires de commande de groupes fonctionnels ou à un dispositif de commande automatique secondaire [1 et 2].

Les possibilités de combinaisons illustrées par les figures 4 à 6 montrent que le système Secontic se prête avec une très grande souplesse à la réalisation de programmes de commande compliqués dans lesquels on applique le principe illustré par la figure 3.

En raison des sollicitations thermiques apparaissant dans une turbine à vapeur, on ne peut obtenir, par exemple, les conditions optimales de mise en vitesse et de prise de charge que si les ordres sont émis sous la forme d'impulsions. Les durées des impulsions et des intervalles qui les séparent peuvent alors être adaptées à l'aide d'un dispositif additionnel [3].

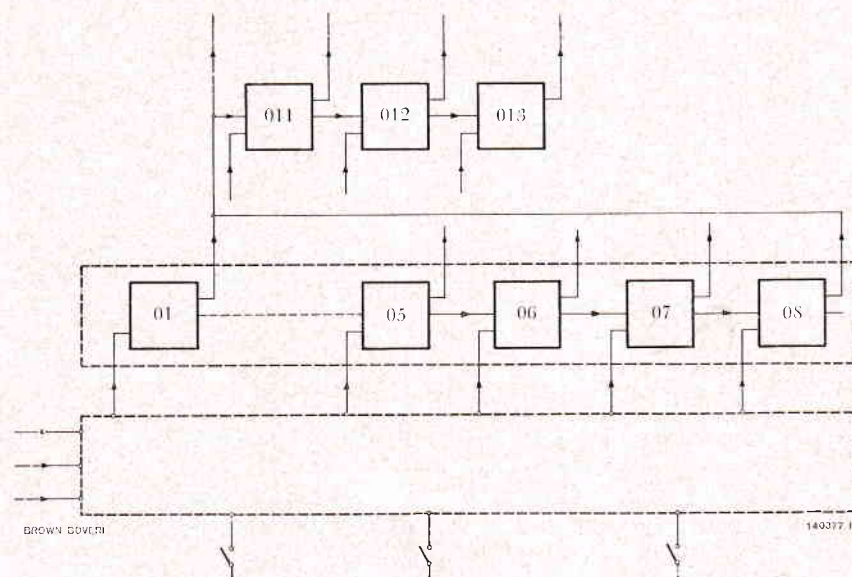


Fig. 5. — Commande répétée d'un dispositif de commande secondaire par les unités de pas de l'équipement principal

01 à 08 unités de pas de l'équipement principal
011 à 013 unités de pas de l'équipement secondaire

Dans ce cas, le sous-programme commandé par l'unité de pas 01 se répète lors de l'exécution du pas 08.

Il nous faut encore préciser que tous les circuits de commande ne travaillent qu'avec des signaux statiques résultant de décisions logiques. On n'a donc pas besoin d'organes temporisateurs supplémentaires ou de mémoires temporaires et l'on est certain que le fonctionnement est indépendant d'ajustements de retards.

Le bloc de surveillance

Surveillance des temps impartis

Afin qu'une interruption ou un retard survenant dans le déroulement du programme soit décelé rapidement, les durées de fonctionnement des divers organes de manœuvre sont surveillées. L'ensemble des signalisations correspondant à l'exécution d'ordres ou à un état déterminé de l'installation doit parvenir dans un délai fixé d'avance. L'attribution des temps impartis pour chaque opération se fait par l'intermédiaire d'une matrice (fig. 9). Si l'un de ces temps est dépassé, en raison de la défection d'un organe de manœuvre ou de la rupture d'une connexion, la progression du programme est interrompue en même temps que s'allume une lampe de signalisation et la possibilité d'intervention de la commande manuelle est libérée, dans le cas où cette possibilité était empêchée par un verrouillage pendant la marche automatique.

Surveillance des signalisations

Pour obtenir un degré de sécurité aussi élevé que possible tant en ce qui concerne le déroulement du programme que le fonctionnement de l'installation, chaque signalisation est surveillée en rapport avec l'état de l'installation. Toutes les signalisations rela-

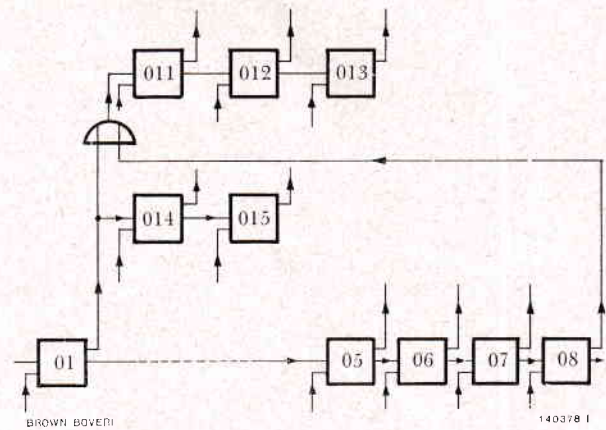


Fig. 6. - Combinaison des possibilités illustrées par les figures 4 et 5

L'unité de pas 01 provoque l'exécution de deux sous-programmes 011, 012, 013 et 014, 015. L'unité 08 provoque la répétition de l'un d'eux seulement.

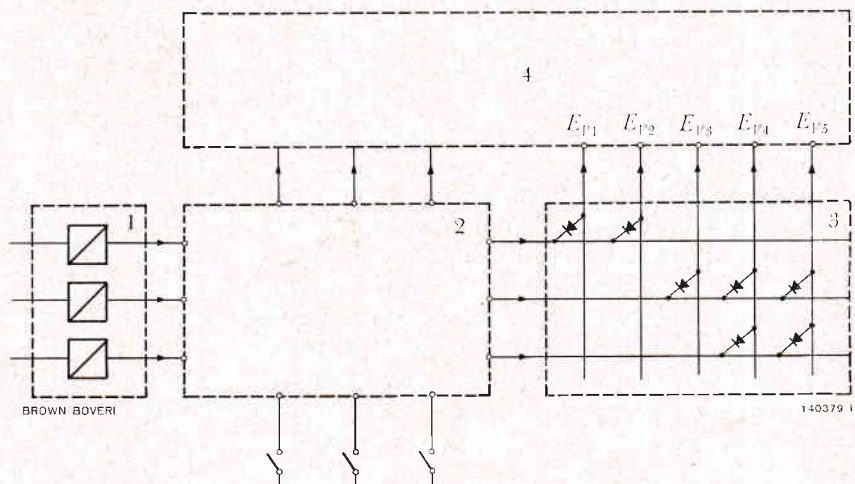
tives à un pas du programme doivent parvenir à la matrice de surveillance et ce n'est qu'alors que les ordres peuvent être émis.

Si l'une des signalisations nécessaires manque, il en résulte, suivant ce qui avait été fixé dans la matrice, soit un arrêt de la progression du programme avec libération de la commande manuelle, soit une régression amenant l'installation dans un état non dangereux ou éventuellement au repos. A cet effet, l'appareillage automatique est en mesure de provoquer de lui-même un changement de programme, par exemple en raison de la réception de certaines signalisations, et de déterminer par un

Fig. 7. - Ensemble des unités de pas avec matrice de surveillance

- 1 = transmetteurs d'entrée
- 2 = matrice de programme et de progression
- 3 = matrice de surveillance
- 4 = ensemble des unités de pas
- E_V = entrée de surveillance

Les signalisations reçues par l'intermédiaire des transmetteurs 1 et de la matrice 2 et qui sont encore nécessaires pour la suite des opérations sont attribuées aux entrées E_V des unités de pas et surveillées par ces dernières.



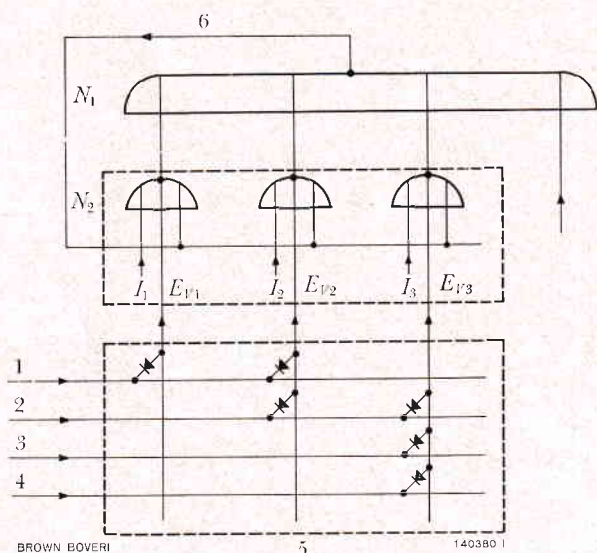


Fig. 8. - Circuits de surveillance

- 1 à 4 = signalisations
 5 = matrice de surveillance
 6 = circuit de maintien
 E_V = entrée de surveillance
 I = signal d'indice
 N_1, N_2 = circuits NI

Une absence de signalisation correspond à un signal logique «1» à l'entrée E_V . Si l'unité de pas n'est pas en action, il existe également un signal «1» à l'entrée I . Il y aura par conséquent un signal «0» à la sortie du circuit N_2 . Si au contraire l'unité considérée est en action, I se trouve lié à 0 et il apparaîtra également un signal «0» à la sortie de N_2 dans le cas où la signalisation correspondante manque, comme dans le cas de l'unité qui n'est pas en action. Le dérangement est ainsi localisé et mémorisé grâce au circuit de maintien 6.

processus d'exploration l'unité de pas du nouveau programme correspondant à l'état de l'installation. Une telle régression avec changement de programme est particulièrement importante lorsque la sécurité de l'installation dépend dans une large mesure de la réception des signalisations. Une régression dans le même programme provoque, par la répétition des ordres, une nouvelle tentative d'amener l'installation dans l'état désiré.

L'arrêt de la progression du programme aussi bien que la régression avec ou sans changement de programme sont signalés. Ces diverses possibilités exigent que la matrice de surveillance soit divisée en trois parties. Dans la partie de matrice représentée sur les figures 7 et 8, la signalisation 1 devant être surveillée par les unités de pas 1 et 2 leur est transmise par les entrées respectives E_{V1} et E_{V2} . Pour faciliter la compréhension, on a dessiné sur la figure 8 quelques circuits de surveillance qui comprennent la

matrice, l'élément NI N_1 ainsi que les éléments NI N_2 attribués aux unités de pas.

Il apparaît à la sortie de l'élément NI N_2 un signal logique 1 lorsqu'on a un signal 0 sur chacune des entrées, c'est-à-dire lorsque le pas considéré est en action et est caractérisé par un signal 0 à la sortie I correspondant à son indice et lorsque toutes les signalisations correspondantes sont transmises par la matrice aux entrées E_V . Comme il n'y a toujours qu'un pas en action, on ne peut avoir un signal 1 que sur l'une, au plus, des sorties de N_2 . S'il n'en était pas ainsi, cela dénoterait l'existence d'une perturbation; on aurait alors, à la sortie de N_1 , un signal 1 qui empêcherait, à cause du circuit de maintien, de modifier cet état. Une perturbation est ainsi mémorisée et localisée dans l'ensemble composé de N_1 et N_2 . Une entrée de remise à l'état initial permet le retour à zéro de la mémoire occupée.

Surveillance des incompatibilités

Pour éviter que des décisions logiques soient prises à faux lors de courts-circuits éventuels, de ruptures de connexions, de mauvais contacts, etc., les signalisations particulièrement importantes sont surveillées en ce qui concerne l'incompatibilité des signaux relatifs à deux états. Un dérangement de courte durée est mémorisé et signalé de manière appropriée.

Le bloc central

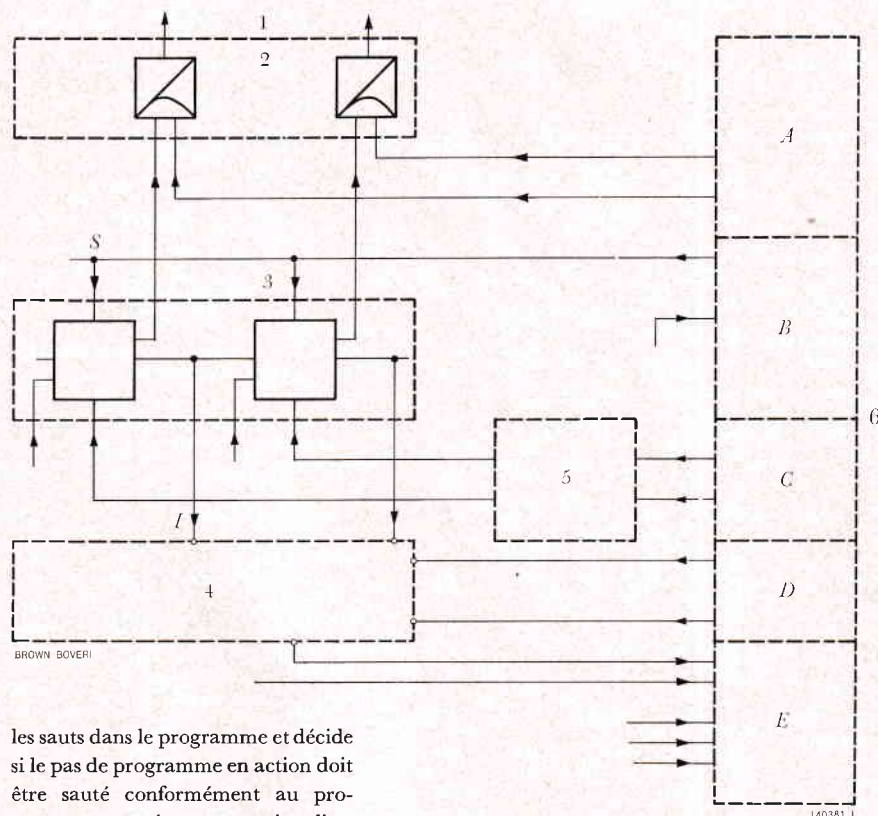
Les durées des temps impartis et celles des temps d'attente, ainsi que les durées des ordres, sont données dans le bloc central (6 dans la fig. 9) par une horloge numérique; les premières sont communiquées aux unités de pas correspondantes par la matrice des temps impartis et les secondes par la matrice des temps d'attente. Les durées des ordres sont données par la même chaîne de comptage qui donne les temps impartis, et les signaux qui les représentent sont mis en relation, dans les organes de sortie, avec les signaux de commande provenant des unités de pas. La partie du bloc central relative au processus d'exploration détermine l'état de l'installation, grâce à la matrice de programme et de progression, et amène l'appareillage automatique dans la position correspondante en faisant sauter les pas inutiles à l'aide des signaux S . Ce cas se présente toujours après un changement de programme ou lorsque des ordres de commande manuelle ont déjà été donnés. Certains ordres sont alors devenus inutiles et le pas le plus élevé possible du programme doit être choisi automatiquement.

D'autre part, le bloc central reçoit les différents signaux d'arrêt pouvant provenir des circuits de surveillance des signalisations, des temps impartis et

Fig. 9. - Bloc central avec l'ensemble des unités de pas

- S = saut dans le programme
 I = signal d'indice
 1 = installation
 2 = organes de sortie
 3 = unités de pas
 4 = matrice des temps impartis
 5 = matrice des temps d'attente
 6 = bloc central
 A = partie de ce bloc qui donne les temps d'ordres de commande
 B = bloc du processus d'exploration
 C = bloc des temps d'attente
 D = bloc des temps impartis
 E = signal d'arrêt du programme

Les durées des ordres, des temps impartis et des temps d'attente sont toutes trois données par le bloc central; la première est liée aux organes de sortie et les deux autres, aux unités de pas, par l'intermédiaire des matrices correspondantes. Le bloc du processus d'exploration est en liaison, d'une part avec la matrice de programme et de progression, d'autre part avec les entrées provoquant



les sauts dans le programme et décide si le pas de programme en action doit être sauté conformément au programme en action ou aux signalisations déjà reçues.

des incompatibilités; il interrompt en cas de dérangement la distribution de toutes les durées de même que l'émission de tous les ordres et empêche enfin la progression du programme dans l'ensemble des unités de pas.

Lorsqu'une signalisation manque, le bloc central, après avoir consulté les conditions qui avaient été fixées dans la matrice de surveillance, provoque éventuellement une régression, soit avec utilisation du même programme, soit avec changement automatique de programme.

Structure du dispositif de commande automatique expliquée à l'aide d'un cas particulier

Nous allons examiner d'un peu plus près les problèmes que nous venons d'énoncer d'une manière générale en nous servant d'une installation en cours de réalisation et montrerons comment ces problèmes peuvent être résolus à l'aide du dispositif Secontic.

L'installation en question comprend un groupe convertisseur de fréquence de 33 MVA installé au

poste de Wimmis des Forces motrices bernoises pour assurer l'interconnexion élastique de son réseau triphasé à 50 Hz avec le réseau monophasé à $16\frac{2}{3}$ Hz du Chemin de fer BLS [7].

Sur la demande des utilisateurs, le dispositif de commande a été complété par la possibilité de commander directement tous les appareils à la main. Aussi a-t-il été nécessaire de séparer les circuits de protection afin qu'ils puissent intervenir à chaque instant – aussi bien lors de la marche avec commande manuelle que lors de la marche automatique, indépendamment des mesures prises par le système Secontic – et assurer la protection de l'installation contre les courts-circuits et autres dérangements possibles.

De plus, comme l'état de l'installation est quasi stationnaire en ce qui concerne les positions des disjoncteurs, sectionneurs, contacteurs, soupapes, valves et autres organes de manœuvre, dès que la liaison a été établie entre les deux réseaux, et en raison du système de protection superposé, le choix s'est porté sur un dispositif se bornant à assurer le démarrage et l'arrêt automatique, c'est-à-dire un dispositif qui n'est mis en œuvre que pour une durée limitée.

TABLEAU I

Extrait du tableau (pas 1 à 16) concernant l'établissement du programme des signalisations pour le programme I, démarrage en régime de convertisseur

Signalisation	Pas															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Convertisseur d'excitation branché		○	●													●
Sectionneur du neutre du moteur triphasé ouvert			○	●							●					
Sectionneur de la machine Scherbius ouvert			○	●							●					
$n > 80\%$ de la vitesse nom. pour le convert. synchr. de régul.				○	●											●
Pompe de graissage du palier II enclenchée					○											
Présence de l'huile sous pression des paliers					○	●	●									
Sectionneur du moteur triphasé fermé					●											●
Disjoncteur du transformateur de démarrage enclenché						○	●	●								
Circuit d'excitation de la machine monophasée fermé						○	●									●
Disjoncteur du moteur triphasé fermé							○	●								●
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Démarrateur hydraulique plongé à 5/6							○		●							
Vitesse du groupe principal, $n > 80$ t./min								●								
Convertisseur d'excitation à $n > 90\%$ de la vitesse nominale								●								●
Disjoncteur du transformateur de démarrage ouvert									○	●						●
Interrupteur de shuntage fermé										○	●					●
Démarrateur liquide plongé à 6/6											○	●				
Sectionneur du neutre du moteur triphasé fermé												○	●			●
Sectionneur de la machine Scherbius fermé												○	●			●
Sectionneurs I et II du démarreur hydraulique ouverts													○	●		●
Interrupteurs I et II des machines en cascade fermés														○	●	●
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16

BROWN BOVERI

140600 III

- Ordre
●—● Surveillance de signalisation

Le pas initial 0 est commun aux deux programmes et n'est pas pris en considération pour l'établissement du programme, parce qu'il ne transmet aucun ordre à l'installation. Le tableau montre quand un ordre est émis (quel pas) et la durée pendant laquelle la signalisation correspondante et d'autres informations sont surveillées.

Etablissement du programme

Afin de pouvoir utiliser toutes les signalisations nécessaires pour une certaine succession d'opérations correspondant à l'ordre d'enchaînement fixé par les besoins de l'installation commandée, on doit établir un programme en s'efforçant d'obtenir des conditions optimales en ce qui concerne la sécurité de l'exploitation, la rentabilité et l'efficacité.

Le document de base servant à l'établissement du programme consiste dans l'énumération de toutes les conditions à observer et dont un extrait est donné dans le tableau I.

Il existe pour les groupes convertisseurs du genre de celui qui nous occupe quatre programmes possibles: un programme pour le démarrage du groupe fonctionnant en convertisseur de fréquence avec échange d'énergie entre les deux réseaux, dans un sens ou dans l'autre, un programme pour la marche en compensateur dans le réseau monophasé, dans certains cas particuliers un programme pour la marche en compensateur dans le réseau triphasé, enfin un programme pour l'arrêt du groupe, commun aux trois cas de fonctionnement précités.

Dans l'installation de Wimmis, on s'est limité à prévoir l'appareillage nécessaire pour deux pro-

TABLEAU II
Etablissement du programme des temps (extrait)

Pas	t_U						Pas	t_B				Pas	t_M										Pas
	0	1"	2"	4"	8"	16"...2'		1"	2"...2'	IDB $\frac{1}{4} \dots \frac{4}{1}$	∞		1"	2"	4"	8"	16"	32"	1'	2'	4'	8'... ∞	
0							0					0											0
1		●					1	●				1		●									1
2		●					2	●				2		●									2
3		●					3	●				3		●									3
4		●					4	●				4				●							4
5		●					5	●				5				●							5
6					●		6	●				6		●									6
7		●					7	●				7			●								7
8				●			8	●				8						●					8
9					●		9	●				9		●									9
10		●					10	●				10		●									10
11		●					11	●				11				●							11
12			●				12	●				12		●									12
13		●					13	●				13		●									13
14		●					14	●				14		●									14
15		●					15	●				15					●						15
16		●					16	●				16									●		16

BROWN BOVERI

140601 III

t_U = temps d'attente t_M = temps imparti
 t_B = durée d'un ordre IDB = ordre intermittent
 ∞ = ordre permanent

Les différents temps d'attente et temps impartis sont communiqués aux divers pas et les durées des ordres, aux transmetteurs de sortie correspondants.

grammes, tout en prévoyant la possibilité de le compléter par la suite pour un troisième programme. On a donc choisi la solution comprenant un aiguillage après le pas initial du programme. Le premier des programmes est obtenu par la succession non interrompue des pas 1 à 17 et le second, par celle des pas 18 à 25.

Cela a permis d'obtenir une grande homogénéité dans le déroulement du programme qui se produit sans sauts. Cette particularité se présente dans les cas d'installations où l'on n'utilise qu'un petit nombre de programmes et elle permet de réduire le volume de l'appareillage nécessaire.

On a prévu la possibilité de passer d'un programme à l'autre, même pendant le déroulement de l'un d'eux. Ce passage est très facile grâce au processus d'exploration et, sur la demande de l'exploitant, il ne peut se faire que par décision du personnel de service.

Outre le déroulement du programme dicté par les états successifs de l'installation, le déroulement en

fonction du temps exige la fixation exacte des durées, conformément au tableau II. Les durées des temps impartis, des temps d'attente et les durées des ordres pouvant être choisies sont indiquées dans ce tableau. Dans l'installation de Wimmis, tous les ordres sont donnés par des impulsions, mais cela ne signifie pas qu'il doit en être ainsi dans d'autres cas. Dès que toutes les opérations du programme en cours ont été exécutées, l'appareillage est mis automatiquement hors de service puisqu'il s'agit, comme nous l'avons dit, d'un dispositif destiné uniquement au démarrage et à l'arrêt.

Ces explications ont permis d'esquisser le principe du Secontic. Pour que ce dernier puisse être adapté correctement à l'installation commandée, il est évidemment nécessaire de connaître jusque dans les moindres détails toutes les particularités de la succession des opérations et des états intermédiaires, de même que les propriétés des indicateurs d'état et des organes de manœuvre.

Signalisations

Le bloc des organes d'entrée représente l'un des ensembles importants constituant le dispositif Secontic. Il est visible sur la figure 10 et est utilisé pour le traitement de 20 signalisations.

Pour que chaque signalisation puisse être traitée, que le circuit en question fonctionne avec courant de travail ou avec courant de repos, il est possible, pour tous les organes d'entrée, d'opérer une commutation du côté à courant faible. De plus, on peut établir des liaisons logiques simples entre les circuits individuels de signalisation. A cet effet, tous les éléments sont aisément accessibles et de petits ponts en fil de cuivre pouvant être facilement déplacés assurent une grande souplesse d'adaptation aux particularités de l'installation.

On a attaché un soin tout particulier à l'exécution des circuits de signalisation qui doivent permettre, par des signes distinctifs, de trouver facilement le lieu d'un dérangement éventuel. D'autre part, il est recommandé, pour ne pas nuire à la clarté de la câblerie, de grouper les circuits des signalisations entre lesquelles existe un certain rapport. Dans chaque cas, il faut encore déterminer l'importance que présente l'information transmise.

Les signaux reçus sont alors transmis à une matrice, puis dirigés vers les différents groupes d'appareils. Dans le cas d'un groupe convertisseur de fréquence, cette matrice se compose de trois parties :

- a) la matrice du processus d'exploration dont il sera encore question plus loin ;
- b) la matrice de progression du programme ;
- c) la matrice de surveillance.

Pour simplifier l'exécution et la filerie, ces trois parties sont réunies sur une plaque commune sur laquelle des indications facilitent la recherche des divers circuits. Il est possible d'apporter des modifications au programme par simple déplacement de diodes.

Comme la structure du programme relatif au groupe convertisseur de fréquence est très simple, on a jugé inutile de prévoir une matrice de programme.

Les liaisons nécessaires pour la transmission des ordres de commande et des signalisations entre l'appareillage électronique et l'installation ont été établies à l'aide de fiches codées et verrouillables. Un dispositif additionnel permet de vérifier si toutes les fiches ont bien été branchées. Cette vérification est importante en raison de la possibilité que l'on a, comme nous le verrons encore, de brancher un appareil de contrôle à la place des circuits de signalisation.

Dispositifs de protection

Nous avons déjà dit qu'un système d'appareils de protection est superposé au dispositif de commande automatique. Si un dérangement survient au cours d'un démarrage automatique, la priorité accordée aux relais de protection se manifeste par l'arrêt de l'équipement automatique et par conséquent par la suppression de tout nouvel ordre. Ce sont alors les appareils de protection qui déterminent les manœuvres à exécuter pour amener l'installation à un état ne présentant pas de danger. Le personnel décide ensuite s'il doit mettre hors service les parties de l'installation qui restent en fonction ou s'il doit mettre en œuvre un autre programme de démarrage, dans le cas où cette possibilité n'a pas été bloquée par les opérations de déclenchement.

Processus d'exploration

Si l'on examine très attentivement la suite des opérations devant être effectuées, on constate notamment que dans un même programme un organe de manœuvre peut recevoir un ordre d'enclenchement puis, par la suite, un ordre de déclenchement. Si, à un instant déterminé, l'installation se trouve dans un état où, par exemple, l'ordre de déclenchement a déjà été donné, il peut arriver, lors d'un recom-

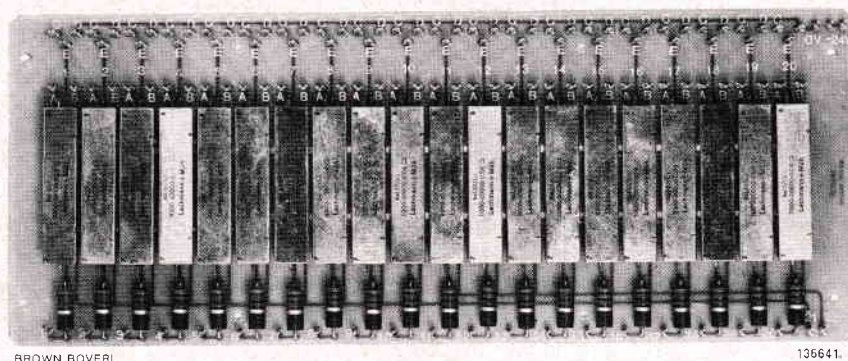


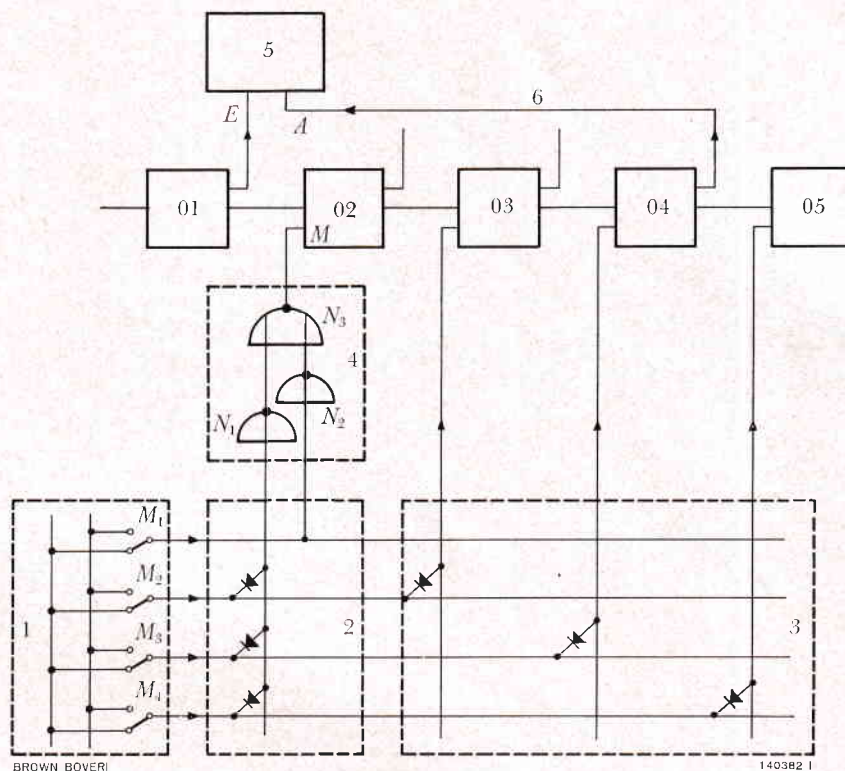
Fig. 10. — Bloc des transmetteurs d'entrée

Ce sont des relais reed qui servent d'organes de conversion ; la tension est adaptée à l'aide d'une résistance en série à la tension de l'installation, chaque ensemble de transmetteurs pouvant être raccordé à deux tensions différentes.

Fig. 11. — Principe du processus d'exploration

- 1 = bloc des organes d'entrée
2 = matrice du processus d'exploration
3 = matrice de progression
4 = circuits de logique du processus d'exploration
5 = organe de manœuvre
6 = contrordre
 M = entrée de l'ordre de progression
 E = ordre de fermeture
 A = ordre d'ouverture

Un signal logique 0 à l'entrée de progression M signifie que le pas doit être franchi immédiatement sans émission d'ordres. Ce cas se présente pour l'unité de pas 02 lorsque la signalisation M_1 relative à l'exécution d'un ordre émis par l'unité 01 est déjà présente. On doit arriver au même résultat si l'on admet qu'un contordre a été émis par l'unité 04. Lorsque l'installation arrive à l'état correspondant au pas 04, M ne change pas sous l'effet du contordre.



Si un processus d'exploration est déclenché lors d'un nouveau démarrage du programme, le pas 01 se passera sans émission d'ordre; en effet, un signal «0» est transmis, par l'intermédiaire des inverseurs N_1 et N_3 , à l'entrée M du pas 02, puisque les conditions M_2 , M_3 et M_4 sont alors satisfaites.

mencement du démarrage automatique dû à une cause quelconque, qu'un ordre d'enclenchement soit à nouveau émis puisque cet ordre précède l'autre dans la séquence d'opérations. Or cela doit être évité.

Il faut donc vérifier, à l'aide de critères d'état bien déterminés, si l'ordre de déclenchement a été donné et si l'état correspondant a bien été atteint. Dans le cas affirmatif, l'exécution de l'ordre d'enclenchement est empêchée par le fait que les conditions de progression du programme, pour le pas en question, sont remplies. Le problème consiste donc à trouver des critères sûrs qui permettent d'éviter sans ambiguïté l'émission d'un ordre superflu, tel un second ordre de déclenchement, dans notre exemple. Il y a lieu d'examiner avec une attention toute particulière les cas où plusieurs organes de manœuvre, disposés en cascade et dont les cycles fermeture-ouverture sont enchevêtrés, risquent ainsi de recevoir de faux ordres. Le choix des conditions devant éviter l'émission d'un tel contrordre par une unité de pas est fixé par la matrice dite matrice du processus d'exploration et leur examen se fait dans l'ensemble des circuits de logique qui lui est adjoint. Cet ensemble a la même structure pour tous les cas pouvant se présenter. Le principe d'un processus d'exploration est expliqué par la figure 11 à l'aide d'un exemple simple.

Dans la pratique, on s'arrange généralement de telle manière qu'il ne soit pas nécessaire d'explorer, outre les conditions concernant l'unité de pas qui a émis le contrordre, toutes celles de la matrice qui

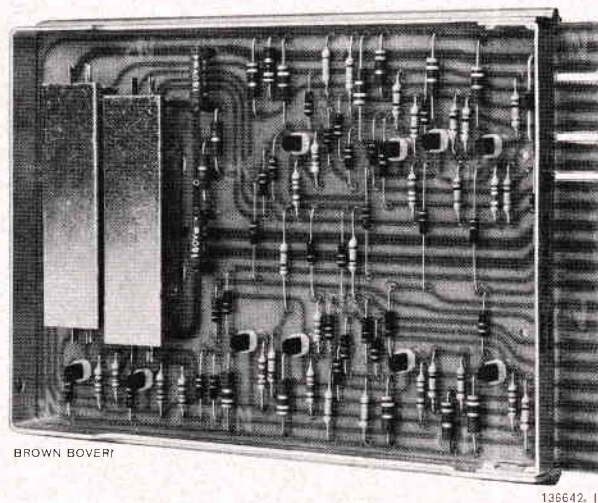


Fig. 12. — Plaquette à circuits imprimés pour deux pas de programme

Cette plaquette porte la désignation 3E dans l'ensemble des éléments électroniques normalisés Brown Boveri.

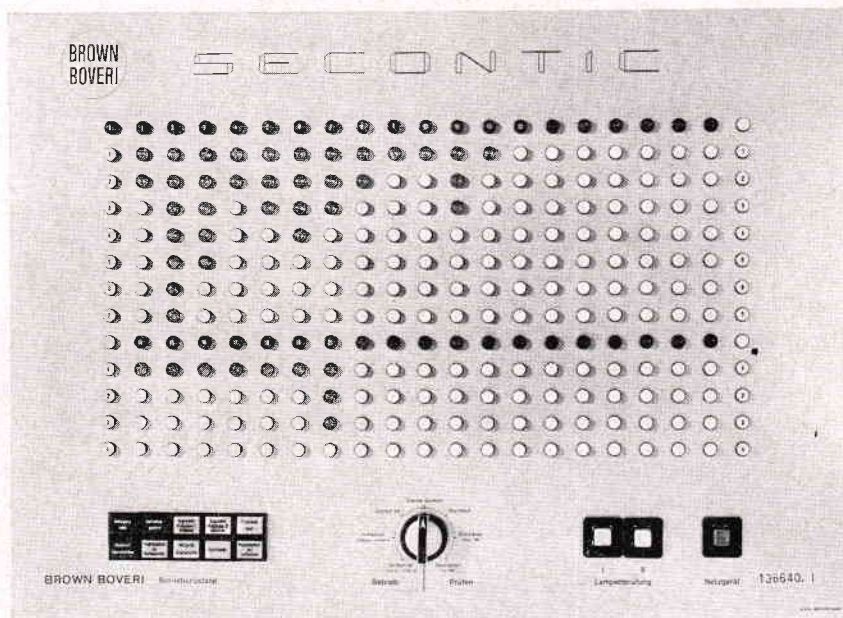


Fig. 13. — Tableau de signalisation

Ce tableau porte les voyants pour les diverses signalisations et les touches lumineuses pour le choix du programme, pour la simulation et le contrôle.

sont comprises à l'intérieur de la boucle relative au contrordre. On arrive ainsi, avec un peu d'adresse, à simplifier notablement l'appareillage.

Ensemble des plaquettes de programmes

Les unités de pas sont réalisées sous forme de plaquettes à circuits imprimés venant s'introduire dans une prise à contacts multiples. La figure 12 montre une telle plaquette portant tous les éléments nécessaires pour deux unités de pas: résistances, condensateurs, semiconducteurs au silicium, relais reed, etc. Ces plaquettes constituent des ensembles normalisés de la technique électronique Brown Boveri.

La structure simple d'une unité de pas permet de l'utiliser aussi pour d'autres tâches. Elle a pu, par exemple, être adoptée pour le pas 0 du programme. Dans un dispositif de commande automatique destiné à rester constamment en service et à assurer la surveillance de l'exploitation, une même unité est utilisée comme unité de régression et assure des tâches totalement différentes. On arrive de cette manière à n'utiliser qu'un petit nombre de plaquettes différentes les unes des autres, ce qui représente un grand avantage à de nombreux points de vue.

Ensemble des organes de sortie

On emploie, pour la commande des diverses parties de l'installation, des contacteurs normaux avec bobine alimentée en courant continu à 48 V. Comme les contacts des unités de pas sont complètement séparés des circuits de l'appareillage élec-

tronique et ne sont liés à aucune source de tension, les contacteurs de manœuvre peuvent être alimentés sous une tension différente de la tension d'alimentation des circuits électroniques. Cette tension est fournie, dans le cas de Wimmis, par une batterie d'accumulateurs alimentant déjà d'autres circuits comme l'installation de télémessure.

Les contacteurs commandent eux-mêmes simultanément plusieurs organes de manœuvre. On utilise pour cela la tension normale de commande de 125 V, comme pour la commande manuelle. Les contacts des contacteurs de commande fonctionnent donc en parallèle avec ceux de circuits correspondants de commande manuelle.

Construction du dispositif de commande automatique

Tout l'appareillage automatique est constitué de petits ensembles ayant la forme de plaquettes emboîtables, à circuits imprimés, qui viennent s'insérer dans des châssis pouvant être superposés et montés dans des armoires, chaque châssis formant généralement une unité fonctionnelle. Ce mode de construction et l'emploi de plaquettes normalisées permettent d'agrandir très facilement un équipement ou de le modifier en remplaçant certains éléments [4].

Dans l'installation de Wimmis que nous avons prise comme exemple, un tableau de voyants (fig. 13) est monté sur la porte de l'armoire du dispositif de commande. Ce tableau montre à chaque instant, pour chacun des deux programmes, l'étape

atteinte dans le déroulement des opérations. Les voyants indiquent aussi bien lequel des pas de programme est en action que les signalisations nécessaires correspondantes. Le choix du programme désiré se fait à l'aide d'un bouton-poussoir qui devient lumineux. Une lampe-témoin indique que le processus de démarrage suit son cours normal, sans perturbation. Le tableau signale aussi tout arrêt de la progression du programme pouvant être provoqué soit par l'absence d'une signalisation indiquant qu'une condition n'est pas remplie, soit par le dépassement du temps imparti pour une opération, soit par l'apparition d'une incompatibilité.

Dans les installations importantes et étendues, on installe souvent un tableau supplémentaire de signalisation au poste principal de commande. Les voyants et appareils de commande peuvent être installés dans des locaux différents, selon les circonstances. Il existe en outre diverses possibilités de contrôle que l'on peut mettre en jeu au moyen d'un commutateur rotatif à plusieurs positions. En mettant ce commutateur dans la position «commande manuelle guidée», le conducteur de l'installation envoie lui-même les divers ordres et l'équipement automatique vérifie, par le truchement des signalisations, si toutes les opérations se font correctement. Dans la position «déroulement du programme sans émission d'ordres», toutes les unités de pas du programme choisi sont successivement vérifiées. Si un dérangement s'est produit, que ce soit une connexion interrompue, un élément défectueux ou autre chose, le déroulement s'arrête sur le pas affecté du dérangement qui est ainsi signalé. L'opération «simulation», avec ou sans surveillance des temps impartis, permet de simuler les signalisations à l'aide d'interrupteurs à bascule montés sur un tableau affecté à cette opération, pour contrôler si l'appareillage automatique fonctionne bien, conformément au programme et vérifier tous les temps.

Alimentation en courant

Les sources devant fournir le courant sont choisies en tenant compte dans chaque cas des conditions locales. L'énergie électrique nécessaire peut en effet être fournie par des batteries d'accumulateurs, par l'intermédiaire de convertisseurs continu/continu ou par des appareils d'alimentation raccordés à un réseau à courant alternatif. Dans l'exemple que nous avons examiné, l'appareillage électronique est alimenté par un redresseur branché au réseau triphasé à 380 V, 50 Hz, tandis que les contacteurs de commande sont alimentés par une batterie à 48 V et les circuits de signalisation, par une batterie à 125 V.

(P. H.)

JOSEPH REDING et GERHARD WANDL

Bibliographie

- [1] U. SCHMUDLACH, R. SEIDEMANN: BBC-Prozesssteuerung mit Funktionsblöcken für die Kraftwerksautomatisierung. *BBC-Nachr.*, vol. 47 (1965), n° 10/11, p. 584 à 589.
- [2] E. KLEINER, D. ADELMANN: BBC-Funktionsblöcke für die Prozessautomatisierung. *BBC-Nachr.*, vol. 47 (1965), n° 10/11, p. 590 à 594.
- [3] M. SALM et W. ENDRES: Démarrage et variations de la charge de turbines à vapeur. *Rev. Brown Boveri*, t. 45 (1958), n° 7/8, p. 339 à 347.
- [4] R. ZWICKY, CH. HAHN et M. SCHÖNSLEBEN: Le développement de la technique électronique Brown Boveri. *Rev. Brown Boveri*, t. 50 (1963), n° 8, p. 465 à 475.
- [5] U. CLEVE et U. SAUERBECK: L'automatisation dans les centrales thermiques. *Rev. Brown Boveri*, t. 51 (1964), n° 3, p. 121 à 130.
- [6] H. PFENNINGER: Centrales automatiques à turbines à gaz. *Rev. Brown Boveri*, t. 51 (1964), n° 3, p. 131 à 144.
- [7] Voir *Rev. Brown Boveri*, t. 51 (1964), n° 8/9, numéro spécial sur les convertisseurs de fréquence.

Réducteurs de vitesse à engrenages pour turbines industrielles Brown Boveri

621.833:621.165.6

La Société Brown Boveri a mis au point une série de réducteurs de vitesse construits spécialement pour être utilisés avec les turbines industrielles à contre-pression. L'auteur, C.G. WAHL, indique les facteurs qui ont déterminé les caractéristiques de ces réducteurs et donne des renseignements sur leur conception.

Exposé du problème

Les turbines à vapeur de faible puissance ont toujours été construites pour tourner à grande vitesse. C'est pourquoi il a toujours été nécessaire d'utiliser des réducteurs à engrenages pour transmettre leur puissance aux machines entraînées.

Il allait de soi que les réducteurs nécessaires pour la série de turbines industrielles DGI mise au point il y a quelque temps devaient avoir les mêmes caractéristiques favorables que ceux des centaines de réducteurs en service depuis des années, à savoir : roues avec denture hélicoïdale, collet de compensation de la poussée axiale, flancs des dents durcis par nitruration.

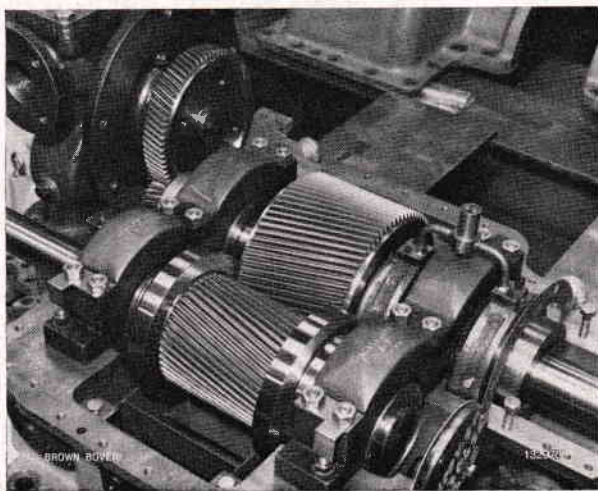


Fig. 1. — Engrenage à paliers lisses inséré entre deux compresseurs installés dans une usine de l'industrie chimique

Puissance: 4000 kW; vitesses: 9240/15532 t./min;
vitesse périphérique: 137 m/s.

Nos engrenages antérieurs, de construction normalisée (fig. 1), avaient été conçus pour pouvoir fonctionner aussi bien en réducteurs, pour l'entraînement d'alternateurs par des turbines à vapeur et à gaz, qu'en multiplicateurs de vitesse pour l'entraînement de soufflantes et compresseurs axiaux et centrifuges à grande vitesse par des moteurs électriques. Ces engrenages pouvant être associés aux machines les plus diverses sont construits de manière à pouvoir autant que possible être montés sans qu'il soit nécessaire d'y apporter aucune modification, sauf bien entendu l'adaptation des bouts d'arbre et de leur hauteur au-dessus du plan d'appui. Ils constituent donc un organe de transmission en quelque sorte indépendant inséré dans un groupe de machines.

Les points de vue qu'il a fallu considérer dans l'étude des engrenages destinés aux turbines dites industrielles, c'est-à-dire aux turbines, généralement à contre-pression, utilisées pour produire de l'énergie électrique dans les entreprises industrielles, sont tout différents. Ces engrenages devaient être conçus en fonction des tâches qu'ils sont appelés à remplir. Ils ne doivent donc être associés qu'à la turbine qui leur correspond, mais de cette association doivent découler des conditions de fonctionnement optimales.

La série des différents types

Comme la puissance d'une turbine déterminée peut varier entre de larges limites suivant la pression de la vapeur qui l'alimente et la contre-pression avec laquelle elle fonctionne, la solution qui vient naturellement à l'esprit et consiste à n'associer qu'un seul type d'engrenage à chaque turbine a été abandonnée. Il a paru préférable de prévoir, pour chaque grandeur de turbine, la possibilité de lui associer trois grandeurs différentes d'engrenages, suivant la puissance devant être transmise. Cette solution présentait en effet divers avantages.

Pour une vitesse de rotation donnée, le rendement d'un engrenage atteint toujours sa valeur la plus élevée lorsque la puissance transmise est égale à la

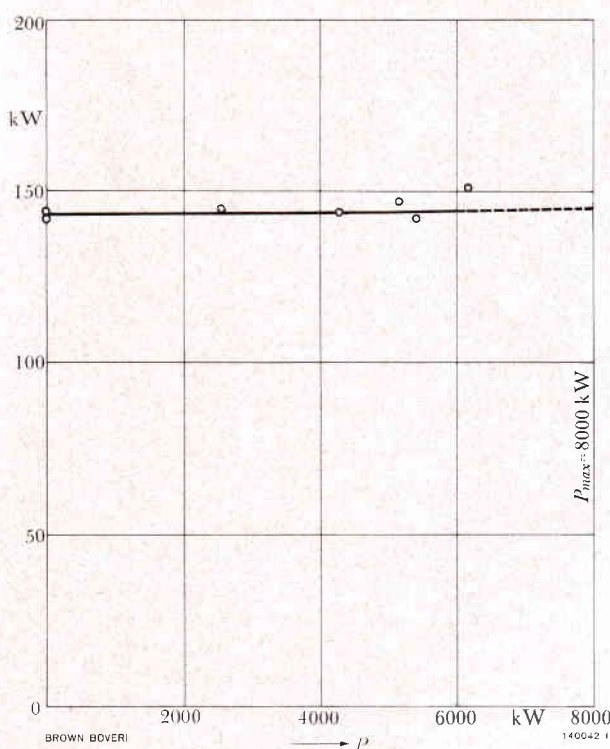


Fig. 2. — Pertes du réducteur à engrenage inséré entre une turbine à gaz et l'alternateur qu'elle entraîne, en fonction de la puissance P aux bornes

Puissance nominale 6080 kW, puissance maximale 8000 kW, vitesses 4780/3000 t./min, vitesse périphérique 108 m/s.

valeur maximale prévue pour ledit engrenage, comme nous avons déjà eu l'occasion de le montrer dans un article antérieur [1]¹. Si la puissance transmise diminue, la valeur absolue des pertes, notamment pour les engrenages à grande vitesse dans lesquels les vitesses périphériques sont élevées, reste pratiquement constante (fig. 2). Cela est dû au fait que, dans de tels engrenages, les pertes dépendent beaucoup plus des grandes vitesses de frottement des tourillons dans les paliers et dans les dentures que de la pression, déterminée par la puissance, exercée sur les coussinets et entre dents. Les pertes provoquées par ventilation et par écrasement de l'huile entre les dents et pouvant représenter la moitié des pertes totales, ne sont pas influencées par les variations de la puissance. Elles ont à peu près la même valeur à vide et à pleine charge. C'est pourquoi la courbe de la variation des pertes d'un engrenage déterminé, en fonction de la puissance, est très voisine d'une droite horizontale.

Si l'on désirait utiliser un engrenage ayant un rendement de 98 % à pleine charge avec une turbine qui, parce que les caractéristiques de la vapeur qui

l'alimente n'ont pas les valeurs voulues, ne peut développer que 40 % de sa puissance de type, le rendement d'engrenage tomberait à $100 \% - (2 \%) / 0,40 = 95 \%$. Ce résultat équivaut à une diminution d'environ 3 % de l'utilisation de la vapeur, diminution que l'on ne peut tolérer. Ce sont ces considérations qui nous ont conduits à prévoir pour chaque type de turbine, la possibilité de choisir entre trois engrenages correspondant respectivement à la pleine puissance de la turbine, à une puissance comprise entre 40 et 50 % du maximum et à une puissance intermédiaire. Cette possibilité augmentait évidemment le nombre des modèles nécessaires et par conséquent les frais relatifs à ces modèles; elle compliquait également la constitution des stocks. Mais ces inconvénients sont largement compensés par un échelonnement mieux approprié des grandeurs d'engrenages qui permet d'obtenir des rendements globaux plus élevés des turbines avec leur engrenage. Au surplus, les deux engrenages plus petits sont moins chers que celui qui correspond à la pleine puissance de type.

Le tableau ci-dessous donne les caractéristiques principales des engrenages destinés aux turbines des types DGI 265 à 500 [6]. Le grand rapport de réduction relatif aux deux turbines les plus petites entraînant des alternateurs à quatre pôles exigeait des réducteurs à double réduction. Les réducteurs construits pour les plus grandes puissances et entraînant

Caractéristiques techniques des réducteurs pour turbines industrielles

Turbine, type DGI	Réducteur type	Puissance maximale kW	Vitesses t./min
265	NDH 225/43	1 050	18 000/1 500
	NDH 225/45	1 475	
	NDH 228/50	2 500	
315	NDH 325/45	1 650	15 000/1 500
	NDH 327/48	2 455	
	NDH 330/58	4 000	
400	NH 436	3 150	12 000/3 000
	NH 440	4 500	
	NH 445	6 300	
500	NH 536	5 000	9 600/3 000
	NH 540	7 100	
	NH 545	10 000	

La série de ces réducteurs sera encore complétée par des types prévus pour des puissances supérieures.

¹ Nombres entre crochets, voir la bibliographie, p. 36.

des alternateurs à 3000 t./min sont en revanche à simple réduction.

Nos réducteurs peuvent naturellement aussi être équipés des roues nécessaires pour l'entraînement d'alternateurs à 60 Hz, soit pour les vitesses secondaires de 1800 et 3600 t./min.

La lettre D figurant dans la désignation du type NDH des réducteurs pour turbines DGI 265 et 315 indique que la réduction se fait en deux étages. Quant aux nombres, leur premier chiffre désigne la grandeur de la turbine et les deux autres, celle du réducteur.

Particularités de la construction des réducteurs pour turbines à contre-pression, type DGI

Pour réaliser une liaison aussi étroite que possible entre turbines et réducteurs, l'arbre des premières est accouplé rigidement avec l'arbre du pignon des seconds (fig. 3 et 4). Cette solution présente les avantages suivants :

- suppression de l'accouplement à dents usuel ;
- possibilité de supprimer le palier de turbine, côté accouplement, et par conséquent
- diminution des pertes dues aux paliers ;
- réduction notable de la longueur du groupe turbine-réducteur ;
- suppression du palier de butée de la turbine.

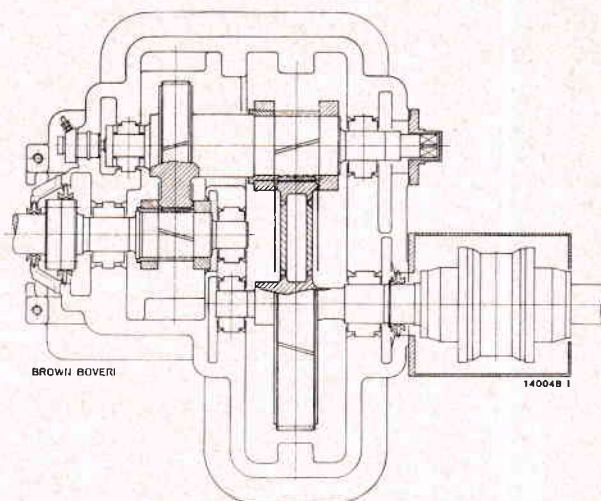


Fig. 3. - Coupe du réducteur à double réduction, type NDH 325/45, pour turbine DGI 315

La poussée axiale pouvant encore être exercée par la turbine est transmise au collet de butée monté sur le pignon et de là au palier de butée à patins de l'arbre de la roue. Comme les paliers de butée pour grandes vitesses de rotation sont plus sensibles que ceux des arbres tournant moins vite et qu'en outre ils provoquent des pertes assez importantes, tandis que le collet de butée transmet pratiquement sans pertes la poussée axiale de l'arbre du pignon à l'arbre de la roue, la disposition indiquée ci-dessus augmente le rendement et améliore en même temps la sécurité de fonctionnement.

Dans les réducteurs à paliers lisses, la construction usuelle est telle que la poussée des dents soulève le

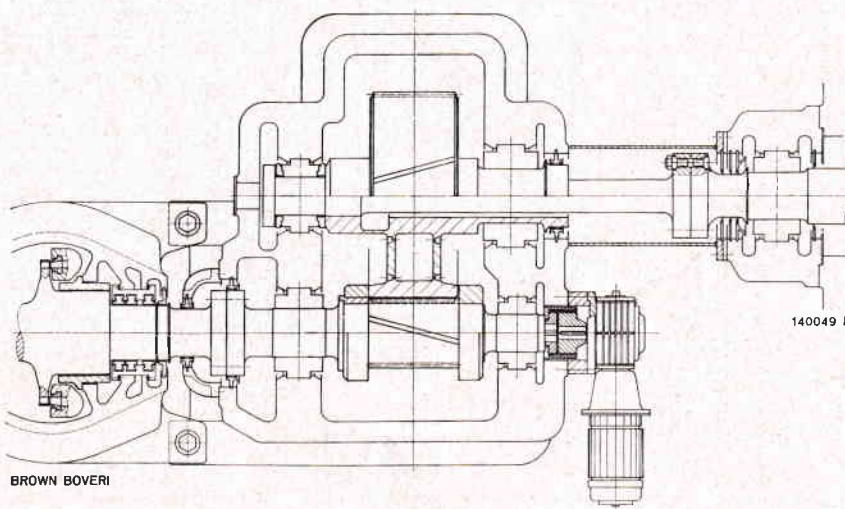


Fig. 4. - Coupe du réducteur, type NH 540, pour turbine DGI 500

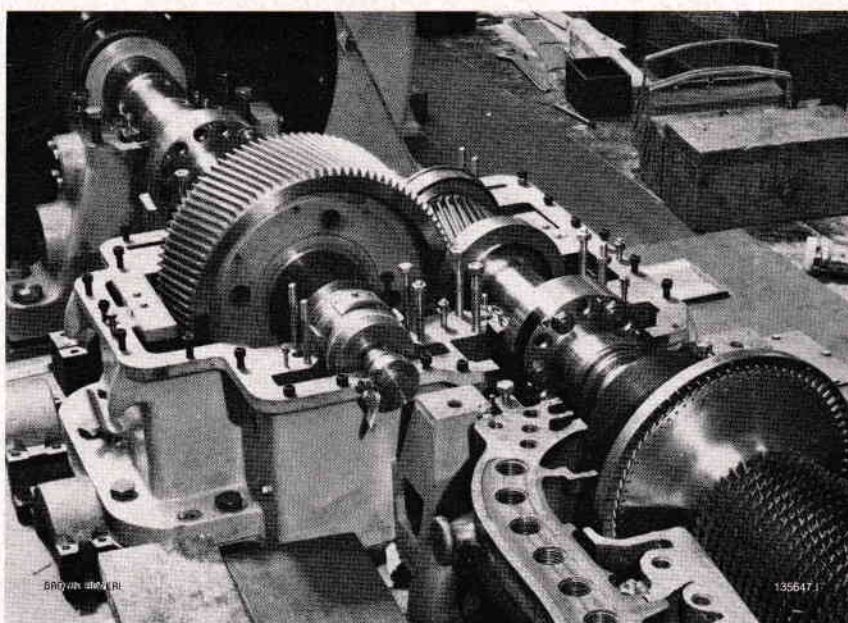


Fig. 5. — Réducteur d'une turbine à contre-pression, en montage dans nos ateliers

pignon et que l'arbre de la roue repose sur le bas du palier. En raison de l'accouplement rigide, cette situation est renversée dans les réducteurs des turbines DGI, c'est-à-dire que le pignon repose sur les paliers, tandis que la roue est soulevée. Il n'y a cependant pas lieu de craindre que cela trouble la tranquillité de la marche. Le fait que les dentures soient durcies permet l'exécution de roues relativement légères. Aussi la composante dirigée vers le haut de la poussée des dents est-elle supérieure au poids de la roue déjà aux faibles charges, de sorte que l'arbre de la roue appuie contre le haut des paliers, même pour les faibles puissances. Il en résulte que, si tout est normal, on est assuré d'obtenir une marche exempte de vibrations. La figure 5 montre l'un de nos nouveaux réducteurs du type NH en montage dans nos ateliers.

L'arbre de la roue des réducteurs à simple réduction est creux. A l'intérieur passe un arbre de torsion qui est accouplé rigidement à l'arbre de l'alternateur. Mais nous pouvons aussi livrer des roues avec arbre plein entraînant l'alternateur par l'intermédiaire d'un accouplement à dents.

Les dentures

Les profils en développantes de cercle de nos dentures sont conformes, à quelques détails près, aux recommandations R 53 de l'ISO. Les dents sont exécutées avec une certaine dépouille pour obtenir un engrenement sans heurts et les arrondis de grand rayon raccordant les flancs au corps de la roue assurent une répartition favorable des contraintes. Dans

certains cas, les dentures sont taillées avec un léger déport, notamment si l'on désire renforcer le pied des dents. La série des modules que nous avons adoptés est échelonnée conformément aux recommandations R 54 de l'ISO.

Nous avons choisi pour nos engrenages la denture hélicoïdale dont la taille est plus simple que celle des dentures en chevrons et qui imposent aux dents des sollicitations moins grandes que celles qui apparaissent dans les engrenages droits cylindriques de mêmes dimensions. Les dentures hélicoïdales sont en outre très favorables en ce qui concerne la tranquillité de la marche.

La poussée axiale qui résulte de la position oblique des dents est absorbée par un collet de butée qui constitue une caractéristique des engrenages Brown Boveri [2]. Ces collets de butée ont non seulement l'avantage de compenser la poussée, pratiquement sans pertes, au voisinage immédiat de l'endroit où elle prend naissance, mais ils évitent les couples apparaissant dans les engrenages à denture hélicoïdale simple sans collet de butée et tendant à faire prendre aux arbres des roues une position oblique dans leurs paliers et par conséquent à imposer des charges inégales aux deux paliers de chaque arbre. Cette dissymétrie risque d'avoir des conséquences nuisibles, surtout pour les arbres de pignons tournant à de grandes vitesses.

Les dentures des pignons et des roues sont soumises à un traitement de durcissement dans des fours de nitruration parcourus par un courant de gaz ammoniac. La résistance des flancs à la pression superficielle et la résistance à la fatigue des pieds des dents

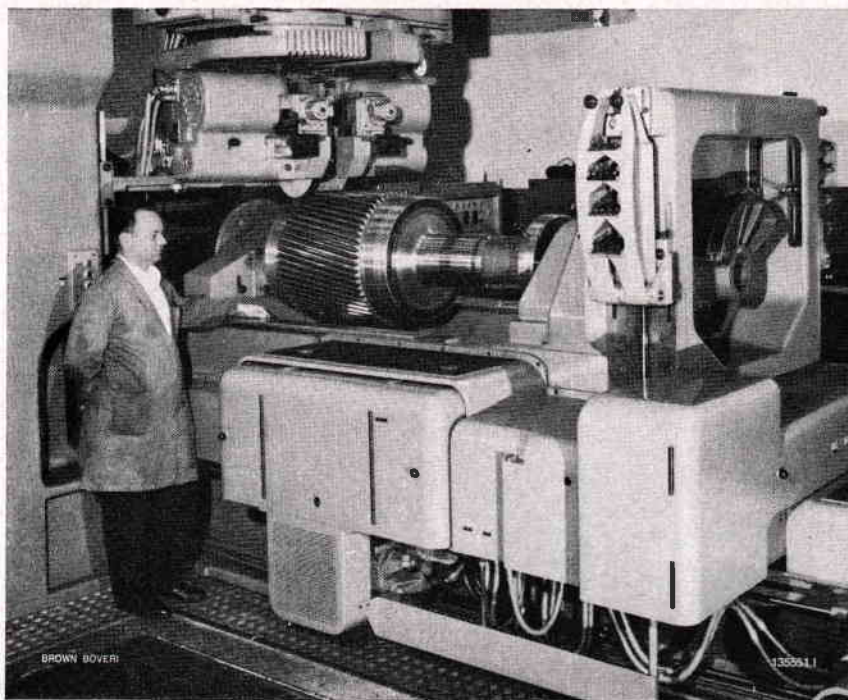


Fig. 6. — Rectification des dents du pignon d'un réducteur de turbine à gaz

obtenues à l'aide de ce traitement sont bien supérieures aux sollicitations apparaissant réellement en service; c'est pourquoi nos engrenages présentent un degré de sécurité très élevé [3, 4].

Les pignons aussi bien que les roues sont usinés sur des machines à tailler de grande précision, puis

nitrurés. Après le durcissement, les dentures sont rectifiées (fig. 6), à moins qu'elles n'aient subi, auparavant, un traitement de rasage (fig. 7) destiné à leur donner la haute qualité de surface nécessaire. Ce traitement permet en effet d'éviter dans de nombreux cas l'opération de rectification.

Paliers lisses

Les arbres tournent dans des paliers lisses avec coussinets garnis de métal blanc. La structure de ces paliers à étrier permet de contrôler facilement le jeu dans les paliers, le jeu entre dents et la portée des dents. Comme cette dernière peut, sous l'influence des changements de température qui se produisent en service, être différente de ce qu'elle est au repos, on enduit les dentures, avant les essais de marche et avant la mise en service définitive, d'une couleur résistant aux effets de l'huile. Après quelques heures de marche, on peut vérifier si les dents portent bien et de manière uniforme sur toute leur largeur. Si ce contrôle ne donne pas entière satisfaction, il est facile de faire les corrections nécessaires, car tous les paliers sont ajustables.

Carters, plaque de base, vireur

Les carters en fonte de nos engrenages (fig. 8), sur lesquels s'appuie également l'enveloppe de la tur-

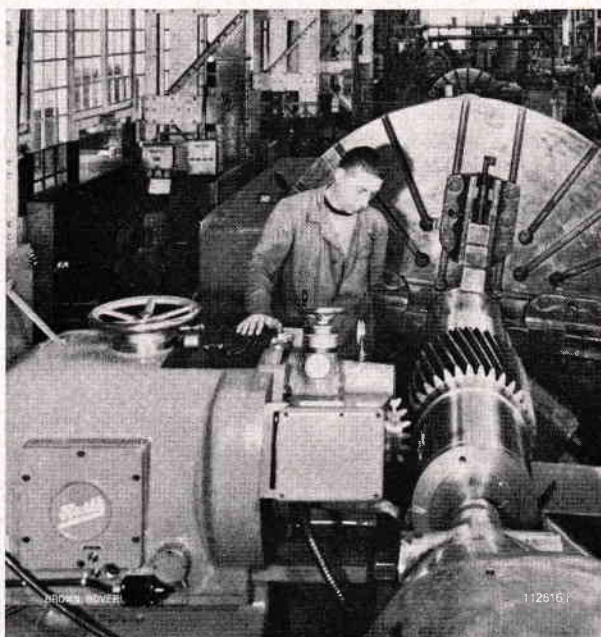


Fig. 7. — Rasage des dents d'un pignon

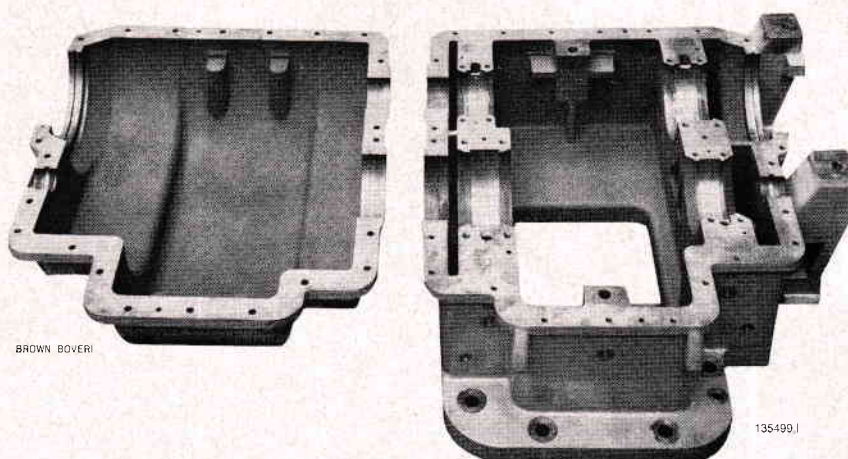


Fig. 8. — Parties supérieure et inférieure du carter d'un réducteur à engrenage pour turbine DGI

bine, sont robustes. Ils reposent sur une plaque de base commune à la turbine et à son réducteur et formant réservoir d'huile. Les organes de réglage sont également fixés sur cette plaque. La forme et les dimensions de cette dernière sont telles qu'elle peut recevoir les trois grandeurs de réducteurs pouvant être accouplés à la même turbine.

Un vireur pouvant être manœuvré à la main est monté sur l'arbre intermédiaire des réducteurs destinés aux deux types les plus petits de turbines, DGI 265 et 315. Les réducteurs des turbines DGI 400 et 500 peuvent être munis à l'extrémité libre de l'arbre du pignon d'un vireur manœuvré à la main ou entraîné par un moteur, tandis que les vireurs des réducteurs pour turbines DGI 630 et 710, les plus grandes, sont toujours entraînés par un moteur.

Essais

Lors de l'étude des nouveaux engrenages pour turbines industrielles, nous avons naturellement cherché à tirer le meilleur parti possible des résultats d'exploitation obtenus avec un très grand nombre d'engrenages construits antérieurement pour de grandes vitesses. L'écart existant entre les valeurs des contraintes sur lesquelles a été fondé le dimensionnement et les valeurs limites de la résistance à la pression superficielle et des contraintes de rupture déterminées sur notre propre plate-forme d'essai et dans des centres de recherche neutres laisse une grande marge de sécurité. Bien que nos engrenages soient dimensionnés d'après des données qui ont été déduites de nos observations et de notre propre expérience, et non d'après les normes en vigueur dans

certains pays, ils satisfont généralement aux recommandations publiées par ces pays. Des calculs de contrôle ont montré que si l'on appliquait les facteurs et formules des AGMA² Standards concernant la résistance des flancs à la pression superficielle et la résistance à la fatigue des pieds des dents, nos engrenages seraient capables de transmettre des puissances supérieures à celles que nous prenons comme base.

² AGMA = American Gear Manufacturers Association.

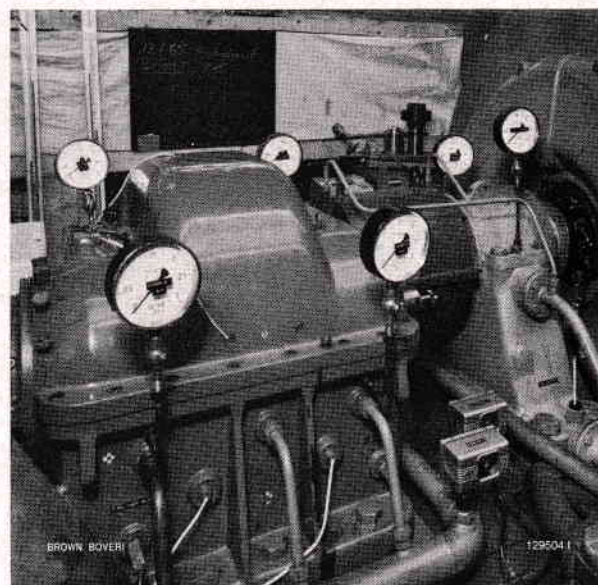


Fig. 9. — Prototype du réducteur, type NH 436, soumis à des mesures de contrôle sur la plate-forme d'essai

Lors des essais du prototype de notre turbine, type DGI 400, sur notre plate-forme de Baden, nous avons effectué de nombreuses mesures sur le réducteur NH 436 destiné à fonctionner avec elle (fig. 9). Le rendement a été déterminé par la mesure de l'échauffement de l'huile et de la chaleur rayonnée par la surface du carter. Les résultats de ces mesures ont pleinement confirmé les estimations que nous avions faites. Les pertes, à la charge nominale, se sont élevées à 2,1 %; elles se sont même réduites à 1,9 % pour la puissance maximale. Précisons que les dentures du réducteur essayé n'avaient pas subi l'opération de rectification. Avec l'exécution normale, c'est-à-dire avec des dentures rectifiées, les pertes de frottement des dents seraient plus faibles et le rendement, encore plus favorable.

(P. H.)

CARL GOTTFRIED WAHL

Bibliographie

- [1] C.G. WAHL: Zahnradgetriebe mit nitrierten Verzahnungen für hohe Umfangsgeschwindigkeiten. *Z. Ver. deutsch. Ing.*, vol. 100 (1958), n° 6, p. 252 à 254.
- [2] C.G. WAHL: Konstruktion von Grossgetrieben. *VDI-Ber.* 47 (1961), p. 115 à 126.
- [3] C.G. WAHL: La nituration, procédé de durcissement des dentures d'engrenages. *Rev. Brown Boveri*, t. 50 (1963), n° 6/7, p. 446 à 457.
- [4] H. RETTIG: Nitrieren im Getriebebau, Versuchsergebnisse zur Belastbarkeit gas- und badnitrierter Stirnräder. *Konstruktion*, vol. 18 (1966), n° 3, p. 107 à 116.
- [5] C.G. WAHL: Konstruktion von Grossgetrieben. *Z. Ver. deutsch. Ing.*, vol. 105 (1963), n° 22, p. 1027 et 1028.
- [6] A. SCHWARZENBACH: Turbines à contre-pression Brown Boveri. *Rev. Brown Boveri*, t. 53 (1966), n° 3, p. 179 à 187.

Méthode des valeurs moyennes dans la théorie des grilles d'aubes

621-226.2

Grâce à une définition judicieuse de l'énergie cinétique du fluide s'écoulant dans une grille d'aubes, il est possible de trouver une méthode de détermination de valeurs moyennes, qui ne présente pas de contradictions. Cette méthode permet d'utiliser les résultats de l'étude unidimensionnelle de l'écoulement uniforme à l'entrée et à la sortie, dans le cas général de l'écoulement non uniforme, dans les grilles comportant des mouvements axiaux, radiaux ou mixtes du fluide. Les grandeurs caractéristiques d'un étage, constitué d'une grille fixe et d'une grille mobile, sont exprimées, pour le cas général, en fonction des grandeurs caractéristiques de chacune des deux grilles.

Introduction

La théorie des grilles d'aubes bidimensionnelles de turbomachines a pour but de déterminer les conditions d'écoulement à la sortie d'une grille donnée, pour des conditions d'entrée quelconques. Pour autant que l'on considère une entrée et une sortie suffisamment éloignées de la grille et que l'on admette l'uniformité de l'écoulement en ces deux endroits, trois grandeurs suffisent à caractériser les conditions de sortie correspondant à des conditions d'entrée données, à savoir: la pression et les deux composantes du vecteur vitesse. Il en résulte que la caractéristique de la grille est complètement déterminée par trois nombres sans dimensions. Ceux-ci constituent la base d'une étude unidimensionnelle.

Une grille fixe et une grille mobile forment ensemble un étage de turbomachine. Les propriétés de l'étage sont déterminées par les coefficients caractéristiques des deux grilles et par la vitesse de rotation de la grille mobile.

Les grilles comportant des aubes de longueur limitée, en particulier les grilles circulaires, ne peuvent pas être caractérisées par un nombre restreint de coefficients, en raison de l'écoulement non uniforme le long des aubes, à l'entrée et à la sortie. Il est toutefois souhaitable de pouvoir caractériser une grille, ou une partie de celle-ci, par des valeurs moyennes convenables, prises le long de l'aube, de manière à pouvoir traiter la grille, en ce qui concerne le rôle

qu'elle doit jouer dans l'étage, comme une grille bi-dimensionnelle. Les propositions relatives à différents modes de détermination de valeurs moyennes ne manquent pas chez les auteurs spécialisés [1, 2, 3]¹. Les moyennes proposées jusqu'ici ne sont toutefois utilisables que d'une manière restreinte. L'observation stricte d'une seule règle, fondée sur la quantité de mouvement ou sur l'énergie, conduit à des insuffisances dans certaines applications.

Essayons de trouver une méthode à la fois judicieuse et claire permettant de traiter rationnellement le problème du rapport existant entre la caractéristique de la grille et celle d'un étage, par exemple, ou celui des pertes secondaires et marginales. Il est nécessaire, pour cela, de préciser quelques notions fondamentales non encore utilisées dans les textes publiés, ou qui le sont sans définition claire et précise.

Les équations fondamentales

Considérons un écoulement stationnaire unidimensionnel à travers un système thermodynamique partiel de turbomachine (fig. 1). Soient q la chaleur et a le travail introduits dans l'unité de masse du fluide.

Nous pouvons écrire les trois équations fondamentales suivantes, à savoir: le premier principe de la thermodynamique²

$$a + q = \Delta h + \Delta K \quad (1)$$

le second principe

$$Tds = dq + Td_i s \quad (2)$$

¹ Nombres entre crochets, voir la bibliographie, p. 44.

² Cette forme de l'équation de l'énergie n'est rigoureusement valable que s'il n'existe pas, à l'entrée et à la sortie, de tensions normales autres que la pression thermodynamique p . On tient compte du champ de gravité en adjoignant au second membre de (1) et de (2) un terme $+\Delta\Phi$, Φ désignant le potentiel de gravité. On nomme souvent a , sans raison pertinente, travail « technique ».

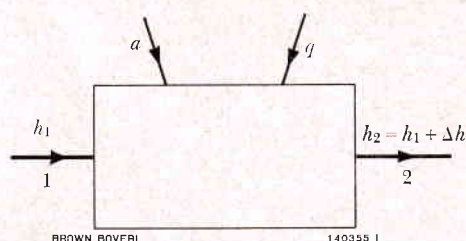


Fig. 1. — Système partiel de turbomachine

Le système partiel considéré dans une turbomachine peut comprendre une ou plusieurs grilles d'aubes. Le fluide entre en 1 et ressort en 2. Chaque unité de masse du fluide reçoit le travail a et la chaleur q . L'enthalpie massique s'accroît de Δh .

et l'équation de Gibbs

$$dh = Tds + vdp \quad (3)$$

où p , v , T , s , h et $K = c^2/2$ désignent la pression, le volume, la température, l'entropie, l'enthalpie et l'énergie cinétique du fluide dont la vitesse $\vec{c}$ est supposée uniforme. Les différentielles désignent des accroissements ou des apports infinitésimaux. $d_i s$ est la production d'entropie par transformation irréversible. Δ désigne un accroissement au passage du système. Nous n'employons jamais la grandeur extensive, mais toujours la grandeur massique, obtenue en divisant par la masse.

Soit

$$e = a - \Delta K \quad (4)$$

l'énergie transformée

$$y = \int vdp \quad (5)$$

le travail indiqué (réversible) du fluide et

$$i = \int T d_i s \quad (6)$$

la dissipation. Les intégrales ci-dessus s'entendent le long de la courbe d'évolution de l'état statique. Il résulte de (1) à (6) :

$$e = y + i \quad (7)$$

Selon l'égalité (4), l'énergie transformée³ e est la fraction du travail introduit converti en énergie

³ Cette notion a été introduite pour la première fois dans [4] sous la désignation « transformation interne d'énergie ». TRAUPEL ([3], § 1.4) lui donne le nom de « travail total », mais ne l'utilise pas. Il désigne a par le synonyme « travail global » ([3], § 1.5).

thermique, le reste subsistant sous forme d'énergie cinétique. L'énergie transformée associée à la chaleur introduite se manifeste dans le fluide par un accroissement d'enthalpie. Dans le champ de gravité, y est proportionnel à la hauteur d'élévation d'une pompe ou à la chute (négative) d'une turbine. Nous emploierons aussi ces expressions au sens figuré.

La relation (7) exprime une loi importante de la théorie des turbomachines. Dans une pompe ou un compresseur, la hauteur d'élévation y est produite par l'énergie transformée e , dans une turbine l'énergie transformée $-e$ par la chute $-y$. Dans les deux cas la dissipation représente la perte. Le rendement interne d'un compresseur ou d'une turbine doit, en principe, être défini comme le rapport entre y et e . Ce rapport s'appelle le rendement polytropique [3, 4].

Si un fluide traverse consécutivement plusieurs systèmes partiels d'une turbomachine, chacune des valeurs a , e , y , i relatives au système total est la somme des valeurs relatives aux systèmes partiels. Il n'y a, par conséquent, dans une machine à plusieurs étages ni « perte par échauffement », ni « gain de récupération » [3].

La dissipation définie par l'équation (6) ne doit pas être confondue avec la perte d'« exergie » [3]. Dans la théorie des turbomachines l'« exergie » est peu utilisée.

On peut choisir le signe des grandeurs énergétiques selon deux règles différentes. La première est celle qui a été utilisée plus haut. D'après la seconde règle a et q sont le travail et la chaleur cédés à l'extérieur, tandis que Δ désigne la diminution d'une grandeur. La dissipation étant pour des températures positives essentiellement positive, il faut, selon la seconde règle, changer le signe de i dans (7), ainsi que celui du second membre de (5).

La rangée d'aubes bidimensionnelle

La forme la plus simple d'une grille d'aubes est la rangée bidimensionnelle (fig. 2). Les vecteurs vitesse d'entrée $\vec{c}_1$ sont supposés égaux entre eux, de même que ceux de sortie $\vec{c}_2$, de sorte que les équations écrites dans le chapitre précédent, pour un filet fluide, sont valables pour l'ensemble de l'écoulement.

Considérons d'abord une rangée d'aubes fixe. Aucun travail n'étant fourni, l'énergie transformée e égale, d'après (4), la diminution d'énergie cinétique. Exprimons cette dernière au moyen des composantes

tangentielle (direction du front de grille) et normale; nous obtenons:

$$K = (c_t^2 + c_n^2)/2 \quad (8)$$

et comme en vertu de l'équation de continuité $c_{n1} = c_{n2}$, nous pouvons écrire pour les fluides incompressibles

$$e = -\Delta K = -c_{t\infty} \cdot \Delta c_t \quad (9)$$

relation dans laquelle l'indice ∞ signifie qu'il s'agit de la moyenne arithmétique des valeurs d'entrée et de sortie, affectées des indices 1 et 2.

Considérons ensuite une rangée entraînée à la vitesse $\vec{u}$ dans la direction tangentielle. Un travail a est fourni, dont la valeur est selon le théorème d'Euler

$$a = \Delta(u c_t) \quad (10)$$

Si l'on se sert des composantes w_t et w_n de la vitesse relative et de l'égalité

$$c_t = w_t + u \quad (11)$$

on obtient, en tenant compte de (4), (8) et (10):

$$e = -w_{t\infty} \cdot \Delta w_t \quad (12)$$

Les relations (9) et (12) montrent que l'énergie e d'une grille dépend du mouvement du fluide relativement à la grille et non du mouvement rectiligne

uniforme de celle-ci. L'énergie transformée e représente la charge dynamique de la grille.

Dans l'égalité (11) le sens positif choisi est celui de la vitesse circonférentielle $\vec{u}$. Ce choix est judicieux lorsqu'on a affaire à un étage; dans le cas d'une grille, il est plus commode de considérer comme positive la composante tangentielle moyenne de la vitesse d'une grille décélétratrice (voir fig. 2) et de donner à Δ la signification d'un accroissement. Ce choix détermine un système de coordonnées lié à la grille; nous l'appelons la première règle des signes pour les composantes de la vitesse, règle qui doit être employée en même temps que la première règle des signes pour les grandeurs énergétiques. Nous nommons seconde règle le choix inverse où Δ représente une diminution. Toutes nos équations sont valables pour chacune des deux règles utilisées judicieusement.

Les coefficients sans dimensions de Bidard

Pour caractériser les grilles bidimensionnelles, Bidard [5, 6]⁴ se sert des grandeurs

$$\left. \begin{aligned} m &= e / (\Delta w_t)^2 = -w_{t\infty} / \Delta w_t \\ n &= w_n / |\Delta w_t| \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

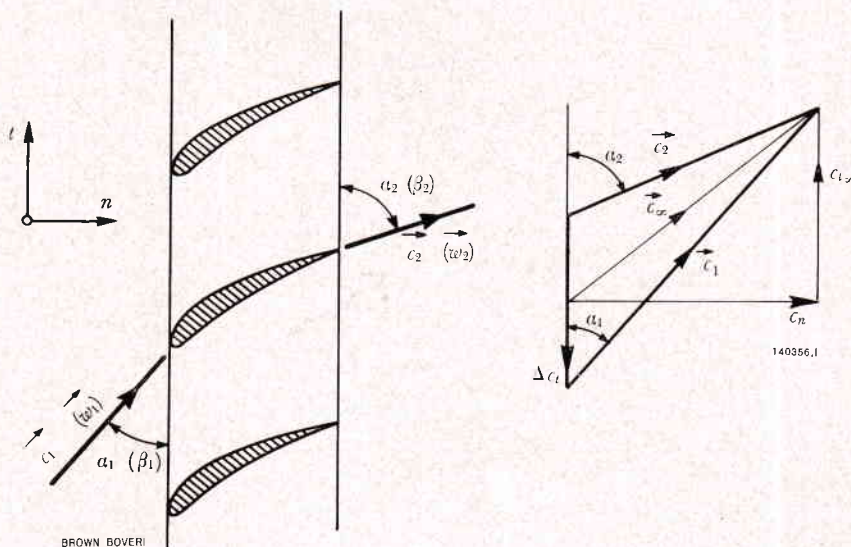
⁴ Les écrits [5] et [6] utilisent exclusivement la seconde règle des signes.

Fig. 2. - Grille d'aubes et triangle des vitesses

Les vecteurs vitesses d'entrée et de sortie caractérisent l'écoulement incompressible à travers une grille bidimensionnelle.

A gauche, ces vecteurs sont représentés sur la grille. Ce sont $\vec{c}_1, \vec{c}_2$ pour une grille fixe et $\vec{w}_1, \vec{w}_2$ (vitesse relative) pour une grille mobile. Les angles qu'ils forment avec le front de grille sont respectivement α_1, α_2 et β_1, β_2 .

A droite, les vecteurs sont assemblés sous la forme du triangle des vitesses. L'indice ∞ désigne la moyenne des vecteurs d'entrée et de sortie, t , la composante tangentielle, n , la composante normale. La figure se rapporte à une grille décélétratrice et est conforme à la première règle des signes.



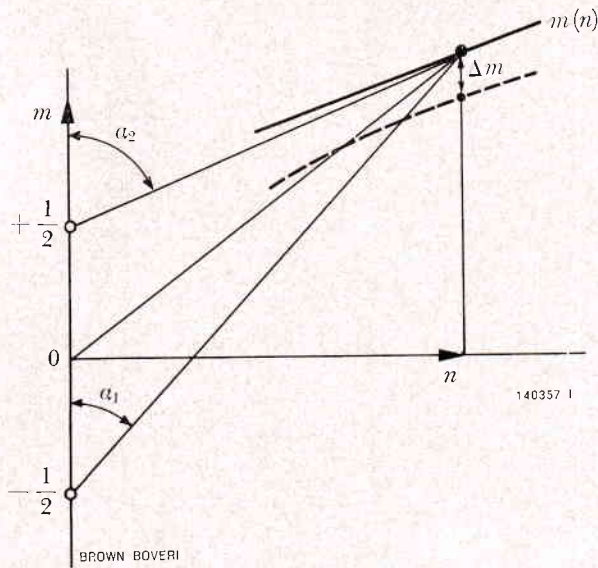


Fig. 3. — Le diagramme m, n de Bidard

On rend les vitesses de la figure 2 sans dimensions en les divisant par l'accroissement $|\Delta c_i|$. Si l'on fait varier la direction d'entrée de l'écoulement, l'extrémité du vecteur $\vec{c}_\infty$ décrit, dans le plan m, n , la courbe représentée par un trait plein. C'est la caractéristique de la grille, relative à l'énergie transformée. En retranchant la dissipation sans dimensions Δm , on obtient (trait interrompu) la caractéristique relative au travail du fluide. En reliant le point (m, n) aux points $m = \pm 0,5, n = 0$, on obtient le triangle des vitesses.

Seippel [7] y ajoute le coefficient de dissipation, caractérisant la perte

$$\Delta m = i / (\Delta w_t)^2 \quad (14)$$

En utilisant la première règle des signes, on obtient en ayant égard à (7): $m - \Delta m = \gamma / (\Delta w_t)^2$. La triade $(m, n, \Delta m)$ caractérise de manière claire et complète la grille d'aubes bidimensionnelle pour un écoulement incompressible.

Dans la figure 3, les grandeurs m et $m - \Delta m$ d'une grille décélétratrice sont reportées en fonction de n . En reliant un point (m, n) aux points $m = \pm 0,5, n = 0$, on obtient le triangle des vitesses de la grille et par conséquent les vecteurs vitesses d'entrée et de sortie [6]. Si l'on compare avec le triangle des vitesses de la figure 2, l'avantage de cette représentation saute aux yeux.

Le comportement d'un étage de turbomachine, composé d'une grille fixe et d'une grille mobile entraînée à la vitesse circonférentielle u , peut être dé-

terminé à partir des coefficients de chaque grille⁵. Par exemple, les coefficients de Rateau [8] $\mu = e/u^2$, $\nu = c_n/u$ et le rendement $\eta = \gamma/e$ d'un étage de turbo-compresseur sont donnés par les équations

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{\nu} &= \left| \frac{2m' - 1}{2n'} + \frac{2m'' + 1}{2n''} \right| \\ \mu &= \nu^2 \left[\frac{m'}{n'^2} + \frac{m''}{n''^2} \right] \\ \eta \mu &= \nu^2 \left[\frac{m' - \Delta m'}{n'^2} + \frac{m'' - \Delta m''}{n''^2} \right] \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

dans lesquelles la première règle des signes est employée. e et γ se rapportent ici à l'étage entier. L'accent simple désigne la grille fixe, l'accent double la grille mobile. Le point de fonctionnement (m', n') est déterminé par l'angle d'entrée du courant dans la grille fixe. Ces équations sont particulièrement simples pour un étage qui se répète. Elles se réduisent pour $n' = n''$ à celles de Bidard [6].

La grille droite

Une grille droite, ayant une longueur d'aube finie, ne peut plus être considérée comme bidimensionnelle lorsque les conditions d'écoulement changent le long de l'aube. Il est utile, dans ce cas, de trouver des valeurs moyennes convenables, permettant de représenter globalement les propriétés de la grille. De telles valeurs moyennes sont directement utilisables dans les grilles à écoulement axial, comportant un faible rapport de la longueur d'aube au rayon de la grille.

Comme les deux côtés de la formule d'Euler (10) se rapportent à l'unité de masse, on multiplie ceux-ci par $\rho w_t dS$ et on intègre sur toute la section de passage S , y compris les jeux éventuels. On obtient, en tenant compte de (11), et à cause de $u_1 = u_2$

$$\hat{a} = u \Delta \hat{c}_t = u \Delta \hat{w}_t \quad (16)$$

L'accent circonflexe indique la valeur moyenne pondérée par la densité de débit, d'une certaine grandeur. Cette moyenne s'écrit

⁵ Cette question est traitée la plupart du temps par le détour du triangle des vitesses, d'où il résulte des expressions compliquées. Voir par exemple [3], § 5.8.

$$\hat{Q} = \frac{\int \rho w_n Q dS}{\int \rho w_n dS} \quad (17)$$

Pour établir la relation (16), l'équation de continuité $(\rho w_n dS)_1 = (\rho w_n dS)_2$ suffit, la condition $w_{n1} = w_{n2}$ n'étant pas nécessaire. La moyenne pondérée par la masse volumique d'une grandeur est indiquée par un trait surmontant le symbole; cette moyenne est:

$$\bar{Q} = \frac{\int \rho Q dS}{\int \rho dS}$$

Pour obtenir la caractéristique de la grille, cherchons à exprimer l'énergie transformée e . L'emploi strict de (17) appliquée à (4) conduit à une grandeur $\hat{e}$, qui ne dépend pas seulement du vecteur $\vec{w}$, mais aussi de $\vec{u}$. Il ne s'agit donc pas d'une grandeur caractéristique de la grille.

L'équation de continuité nous suggère d'utiliser la moyenne $\bar{c}_n$ de la composante normale de la vitesse pour définir une valeur moyenne de l'énergie cinétique K . Ecrivons donc:

$$K^* = (\hat{c}_t^2 + \bar{c}_n^2)/2 \quad (18)$$

De cette manière, l'énergie transformée devient, en écoulement incompressible pour une grille mobile de section invariable, en tenant compte de (16):

$$e = \hat{a} - \Delta K^* = -\hat{w}_{t\infty} \Delta \hat{w}_t \quad (19)$$

ce qui concorde avec (12). Pour une grille fixe, on obtient une relation analogue à (9).

Si l'on définit

$$\left. \begin{aligned} m &= e / (\Delta \hat{w}_t)^2 = -\hat{w}_{t\infty} / \Delta \hat{w}_t \\ n &= \bar{w}_n / |\Delta \hat{w}_t| \\ \Delta m &= \hat{i} / (\Delta \hat{w}_t)^2 \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

on retrouve les définitions (13) et (14).

De manière semblable, on définit les angles de la figure 2 comme suit:

$$\alpha_i = \text{arccot}(\hat{c}_{ti}/\bar{c}_n), \quad \beta_i = \text{arccot}(\hat{w}_{ti}/\bar{w}_n), \quad (i=1, 2) \quad (21)$$

C'est la valeur principale de l'arc cotangente qui doit être prise.

Grâce aux définitions (20) et (21), les avantages des coefficients de Bidard sont conservés. En particulier, il est possible de déterminer le triangle des vitesses à partir de la caractéristique m, n , ou la caractéristique de l'étage à partir des caractéristiques des deux grilles. Dans ce second cas, on utilise (15).

La définition (18) a une valeur fondamentale. La notion d'énergie cinétique d'un ensemble de particules ne peut être définie que par rapport à un système de coordonnées se déplaçant de la même manière pour toutes les particules. Si le mouvement est localement inégal, seule la partie de l'énergie cinétique est intéressante, qui concerne les composantes de la vitesse des particules dans une direction commune. Cette partie est justement celle qui a été isolée, pour notre problème, au moyen de la définition (18). L'autre partie est assimilable à de l'énergie thermique et comparable à l'énergie cinétique du mouvement désordonné des molécules. Ce que nous venons de dire montre que la détermination d'une «énergie moyenne» est vide de sens.

La grille d'aubes circulaire

Admettons maintenant une disposition circulaire des aubes dans un écoulement à direction moyenne axiale [1, 2], radiale [3] ou «mixte». Le théorème d'Euler, pour un filet fluide, s'écrit sous la forme générale du couple:

$$a = \omega \Delta(r c_t) \quad (22)$$

formule dans laquelle ω désigne la vitesse angulaire de la grille tournante et r la coordonnée radiale du filet.

En appliquant la formule (17) à (22) et (11), il vient:

$$\hat{a} = \omega \Delta(\hat{r} \hat{c}_t) = \omega \Delta(\hat{r} \hat{w}_t) + \omega^2 \Delta(\hat{r}^2) \quad (23)$$

Contrairement à ce qui se passe pour (16), le dernier terme ne disparaît pas.

Définissons l'énergie cinétique par⁶

$$K^* = (\hat{c}_t^2 + \bar{c}_n^2)/2 \quad (24)$$

en lieu et place de (18). Le tilde désigne la moyenne du couple pondérée par le débit, selon la formule

⁶ Rectifié selon une communication privée de G. DIBELIUS, Ecole polytechnique d'Aix-la-Chapelle.

$$\tilde{Q} = r \hat{Q} / (\hat{r}^2)^{\frac{1}{2}}, \quad \tilde{r}^2 = \hat{r}^2, \quad \tilde{r} \tilde{Q} = r \hat{Q} \quad (25)$$

La relation cinématique (11) devient

$$\tilde{c}_t = \tilde{w}_t + \tilde{u}, \quad \tilde{u} = \omega \tilde{r} \quad (26)$$

La composante normale perpendiculaire à la direction tangentielle est choisie de telle façon que, dans la troisième direction orthogonale s , la composante moyenne de la vitesse (selon l'équation de continuité) disparaît, autrement dit $\bar{c}_s = 0$ ⁷. Ce choix détermine la section d'écoulement dS perpendiculaire à la direction normale.

On obtient, dans le cas d'une grille tournante (ou fixe, si $\omega = 0$), à partir des relations (23) à (26), après quelques transformations purement algébriques, ce qui suit pour l'énergie transformée, décomposée en ses éléments :

$$\left. \begin{aligned} e &= \dot{a} - \Delta K^* = e_t + e_n + e_\omega \\ e_t &= -\tilde{w}_{t\infty} \cdot \Delta \tilde{w}_t \\ e_n &= -\bar{w}_{n\infty} \cdot \Delta \bar{w}_n \\ e_\omega &= \omega^2 \tilde{r}_\infty \Delta \tilde{r} \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

La division de e en trois parties résulte du fait qu'il existe, en général, dans une grille circulaire, plusieurs possibilités de transformation d'énergie, à savoir : les effets cinétiques dans les directions tangentielle et normale, ou l'action du champ des forces centrifuges. La variation de la composante normale de la vitesse peut résulter soit de la variation de la masse volumique ρ , soit de la variation de la section de passage S . Il est nécessaire de tenir compte du champ des forces centrifuges, car la rotation est absolue en soi et ne peut être considérée que par rapport à un système de référence fixe. On doit par conséquent la faire intervenir dans l'étude théorique de la grille et elle ne peut être remplacée, comme dans le cas de la grille droite, par un mouvement rapporté à une autre grille.

Conformément aux relations (27), on définit les coefficients caractéristiques comme suit :

$$\left. \begin{aligned} m &= m_t + m_n + m_\omega \\ m_t &= e_t / (\Delta \tilde{w}_t)^2 = -\tilde{w}_{t\infty} / \Delta \tilde{w}_t \\ m_n &= e_n / (\Delta \tilde{w}_t)^2 \\ m_\omega &= e_\omega / (\Delta \tilde{w}_t)^2 \\ n &= \bar{w}_{n\infty} / |\Delta \tilde{w}_t| \\ \Delta m &= \dot{a} / (\Delta \tilde{w}_t)^2 \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

Les directions d'écoulement s'écrivent :

$$\alpha_i = \arccot(\tilde{c}_{ti}/\tilde{c}_{ni}), \quad \beta_i = \arccot(\tilde{w}_{ti}/\tilde{w}_{ni}) \quad (29)$$

Les coefficients de Rateau, caractérisant un étage de turbocompresseur, comprenant une rangée fixe placée devant une grille mobile, prennent les valeurs suivantes :

$$\mu = e/\tilde{u}_1^2, \quad \nu = \bar{c}_{n1}/\tilde{u}_1, \quad \eta = y/e \quad (30)$$

L'indice 1 désigne le plan situé entre la grille fixe et la grille mobile. Si l'on pose pour l'étage

$$n_1 = \bar{c}_{n1}/|\Delta' \tilde{c}_t|, \quad \lambda = |\Delta'' \tilde{w}_t/\Delta' \tilde{c}_t| \quad (31)$$

on montre facilement que les équations (15) font place aux relations suivantes (voir annexe) :

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{\nu} &= \frac{1}{n_1} \left(m'_t \mp \frac{1}{2} \right) + \lambda \left(m''_t \pm \frac{1}{2} \right) \\ \mu &= \frac{\nu^2}{n_1^2} (m' + \lambda^2 m'') \\ \eta \mu &= \frac{\nu^2}{n_1^2} [(m' \mp \Delta m') + \lambda^2 (m'' \mp \Delta m'')] \end{aligned} \right\} \quad (32)$$

avec

$$\frac{1}{n_1} = \frac{2 n'}{2 n'^2 \mp m'_n}, \quad \frac{\lambda}{n_1} = \frac{2 n''}{2 n''^2 \pm m''_n} \quad (33)$$

Le signe supérieur est valable pour la première règle des signes, le signe inférieur pour la seconde. Pour un étage constitué d'une grille mobile placée devant une grille fixe, les signes inverses sont valables, sauf en ce qui concerne $\Delta m'$ et $\Delta m''$. Pour un étage de turbine, il faut remplacer dans (30) et (32) η par η^{-1} .

Si l'on a $\lambda = 1$, les relations (32) se réduisent à

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{\nu} &= \frac{1}{n_1} |m'_t + m''_t| \\ \mu &= \frac{m' + m''}{(m'_t + m''_t)^2} \\ \eta^{\pm 1} &= 1 \mp \frac{\Delta m' + \Delta m''}{m' + m''} \end{aligned} \right\} \quad (34)$$

Si $\bar{c}_n$ et $\tilde{r}$ reprennent la même valeur après chaque grille, on peut parler d'un étage qui se répète « en moyenne ». Les relations (34) sont alors valables pour tout un groupe d'étages consécutifs de cette sorte.

⁷ En ce qui concerne les considérations qui suivent, il suffit que $\Delta|\bar{c}_s| = 0$.

Applications

La méthode des valeurs moyennes exposée ci-dessus permet d'étendre considérablement le domaine de validité de la théorie de l'écoulement bidimensionnel dans les turbomachines.

Comme nous l'avons montré, cette méthode permet de généraliser la notion d'étage périodique. Dans le cas de l'écoulement plan, on dit d'un étage qu'il est périodique, quand le vecteur vitesse de sortie est égal au vecteur vitesse d'entrée. Dans le cas tridimensionnel, la condition de périodicité est satisfaite, si les distributions de vitesses avant et après l'étage sont identiques; mais ceci est rarement possible rigoureusement. Dans le cas où l'étage remplit «en moyenne» la condition de périodicité, on peut ramener le problème à celui de l'écoulement bidimensionnel, ce qui permet d'obtenir, pour tout un groupe d'étages, des expressions simples pour les caractéristiques de l'étage. L'emploi de la méthode des moyennes permet aussi de définir un groupe d'étages «quasi périodique»⁸.

Une autre application est le traitement des pertes «secondaires» aux extrémités des aubes, avec et sans jeu. Il s'agit de tirer de résultats expérimentaux les lois régissant les pertes marginales. Les méthodes utilisées jusqu'ici, fondées sur l'énergie [1] et sur la quantité de mouvement [2], de même qu'une méthode mixte ([3], § 5.4), sont quelque peu arbitraires. La méthode proposée ici fournit une marche à suivre claire, permettant d'obtenir exactement l'influence des effets d'extrémité.

La caractérisation d'une grille d'aubes, au moyen de valeurs moyennes, ne doit, bien entendu, pas être poussée trop loin. Dans les grilles axiales circulaires, comportant un effet d'éventail important, certaines influences, propres à l'écoulement tridimensionnel et à l'équilibre radial, ne peuvent plus être négligées. La méthode des moyennes reste toujours juste, en principe, mais la distribution de la densité de débit le long des aubes est influencée par la grille qui précède ou qui suit, de sorte que les moyennes, calculées pour une répartition déterminée du débit, ne constituent plus un signe distinctif de la grille. En d'autres termes, les caractéristiques moyennes d'une grille sont influencées par la grille partenaire de l'étage. Toutefois, il est admissible et utile, dans le traitement numérique du problème tridimensionnel, de diviser l'écoulement en plusieurs bandes, qui seront susceptibles d'être traitées séparément par la méthode décrite.

⁸ Selon une étude faite sur la demande de Brown Boveri par G. DIBELIUS, Aix-la-Chapelle.

Récapitulation

Nous avons montré que pour caractériser le fonctionnement d'une grille, quand l'écoulement n'est pas uniforme à l'entrée et à la sortie, seules importent les moyennes $\tilde{w}_i$, $\bar{w}_n$ et $\hat{i}$. L'énergie cinétique calculée avec ces moyennes est la partie de l'énergie, qui détermine l'effet de la grille. Nous avons trouvé ainsi une caractérisation adéquate et claire de la grille, qui ne dépend que des conditions géométriques, du mouvement du fluide par rapport à la grille et, le cas échéant, de la rotation de celle-ci. Elle ne dépend pas du mouvement relatif de deux grilles par rapport à un système d'inertie quelconque.

On peut avec une grille fixe et une grille mobile composer un étage de turbomachine. Le comportement de l'étage est déterminé par les coefficients caractéristiques de chaque grille, exactement comme pour le cas de la combinaison en un étage de deux rangées bidimensionnelles.

Annexe

Caractéristique de l'étage

Pour un étage comportant une grille fixe précédant une grille mobile, nous désignons par les indices 0, 1, 2 les plans situés devant la grille fixe, entre les deux grilles et après la grille mobile. L'indice ∞ , dont sont affectés c_n , c_t (grille fixe) et w_n , w_t (grille mobile) indique la moyenne arithmétique. En utilisant la première règle des signes, on obtient

$$\left. \begin{aligned} \bar{c}_{t\infty} &= \frac{1}{2} (\bar{c}_{t0} + \bar{c}_{t1}), & \bar{w}_{t\infty} &= \frac{1}{2} (\bar{w}_{t1} + \bar{w}_{t2}) \\ \bar{c}_{t1} &= \bar{c}_{t\infty} + \frac{1}{2} \Delta' \bar{c}_t, & \bar{w}_{t1} &= \bar{w}_{t\infty} - \frac{1}{2} \Delta'' \bar{w}_t \\ \bar{c}_{n1} &= \bar{c}_{n\infty} + \frac{1}{2} \Delta' \bar{c}_n, & \bar{w}_{n1} &= \bar{w}_{n\infty} - \frac{1}{2} \Delta'' \bar{w}_n \end{aligned} \right\} \quad (A1)$$

Divisons (26) par $\bar{c}_{n1} = \bar{w}_{n1}$, pour le plan 1:

$$\frac{\bar{u}_1}{\bar{c}_{n1}} = \frac{\bar{c}_{t1}}{\bar{c}_{n1}} + \frac{\bar{w}_{t1}}{\bar{w}_{n1}} \quad (A2)$$

Le signe de $\bar{w}_{t1}$ a été changé pour respecter la règle des signes de la grille mobile.

En portant les valeurs de (A1) en (A2), on obtient, après une légère transformation et en ayant égard aux relations (27) à (31) et à la somme

$$e = m' (\Delta' \bar{c}_t)^2 + m'' (\Delta'' \bar{w}_t)^2$$

les relations (32) avec (33). Elles se réduisent à (15) pour

$$m_l = m, \quad m_n = 0.$$

Dans le cas où l'on utilise la seconde règle des signes, la modification nécessaire pour un étage comportant une grille mobile précédant la grille fixe, ou pour un étage de turbine, va de soi.

(P. B.)

LANG S. DZUNG

Bibliographie

- [1] G. HUBERT: Untersuchungen über die Sekundärverluste in axialen Turbomaschinen. *VDI-Forschungsheft* 496 (1963).
- [2] H. H. HEBBEL: Untersuchungen über den Einfluss der Machzahl auf die Sekundärverluste eines geraden Turbinen-Schaufelgitters bei hohen Unterschallgeschwindigkeiten. *Z. Flugwiss.* 13 (1965), 9, p. 324 à 333.
- [3] W. TRAUPEL: Thermische Turbomaschinen I. 2^e éd., Springer, Berlin 1966.
- [4] L. S. DZUNG: Discussion pour «Thermodynamics of cooled turbines» de W. R. Hawthorne. *Trans. ASME*, 78 (1956), 8, p. 1785 et 1786.
- [5] R. BIDARD: Quelques considérations sur l'aérodynamique des grilles d'aubes. *Energie*, 27 (1943), 8, p. 191 à 196.
- [6] R. BIDARD: Thermopropulsion et Turbomachines. *Ecole Nationale Supérieure de l'Aéronautique*, Paris 1963, § 63, § 83.
- [7] C. SEIPPEL: Dampfturbinen von heute. *Schweiz. Bauzeitung*, 77 (1959), 20, p. 305 à 316.
- [8] A. RATEAU: Les turbomachines. *Revue de Mécanique*, 1 (1897), p. 629 à 643, p. 828 à 837.

EN BREF

Le train de laminoirs continu à petits fers de la Italsider S.p.A., Stabilimento di Piombino, Italie

621.771.06-114

1. Equipement d'entraînement principal

Le nouveau train de laminoirs continu à petits fers de l'usine métallurgique de Piombino de l'Italsider S.p.A., comprend 16 cages horizontales et verticales (fig. 1) réparties en trois sections, à savoir:

6 cages dégrossisseuses,
6 cages intermédiaires
et 4 cages finisseuses.

Ces cages sont entraînées par seize moteurs à courant continu représentant une puissance installée totale de 11600 kW et chacun de ces moteurs est alimenté par l'intermédiaire d'un ou de deux mutateurs scellés à six anodes (voir schéma de la fig. 2). Pour faciliter le service et la constitution du stock de pièces de rechange et de matériel de réserve, on s'est contenté de deux grandeurs de moteurs ayant les caractéristiques suivantes:

train dégrossisseur:	600 kW, 400 à 1000 t./min, 750 V, 870 A.
trains intermédiaire et finisseur:	800 kW, 400 à 1000 t./min, 750 V, 1150 A.

Le même principe d'unification du matériel a été appliqué pour le choix des transformateurs de mutateurs. La tension primaire est de 10 kV. Chacune des sections comprend un disjoncteur principal et à chaque transformateur est associé un interrupteur-sectionneur.

Le système de régulation des moteurs principaux a été constitué à l'aide d'éléments choisis parmi notre série d'éléments électroniques, normalisés et complètement transistorisés formant la base de la technique électronique Brown Boveri. Ce système comprenant des boucles de réglage en cascade permet de limiter le courant à une valeur très précise et de régler la vitesse des moteurs de manière que les écarts statiques, par rapport à la valeur prescrite, restent inférieurs ou au plus égaux à 2%.

La conduite du train de laminoirs se fait de deux postes de conduite principaux (fig. 3). Lors de l'établissement des circuits de commande et de réglage, on a évidemment tenu compte des observations les plus récentes que l'on a pu faire dans ce domaine. L'exploitation est presque complètement automatique, de sorte que le personnel de conduite n'a pour ainsi dire qu'à assurer la surveillance générale de l'installation. Les vitesses des différents moteurs, qui jouent un rôle spécialement important dans les trains continus, sont indiquées sur les pupitres par des systèmes numériques.

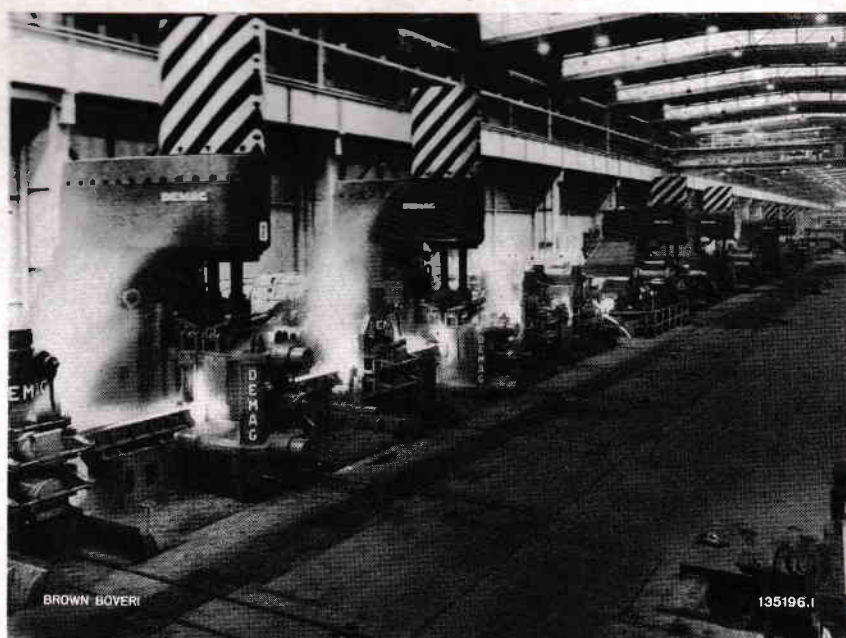


Fig. 1. — Train continu de lami-noirs à petits fers vu dans le sens du laminage

2. Réglage des boucles

Le produit laminé peut former au maximum cinq boucles entre les dernières cages. Ces boucles sont surveillées par des dispositifs sans contacts et les valeurs

prescrites des flèches peuvent être ajustées sur le pupitre de conduite, en cas de besoin. Comme il arrive, selon le programme de laminage, que l'on n'utilise pas toutes les cages, il a été nécessaire de prévoir des possibilités de commutation permettant de modifier les liens de corres-

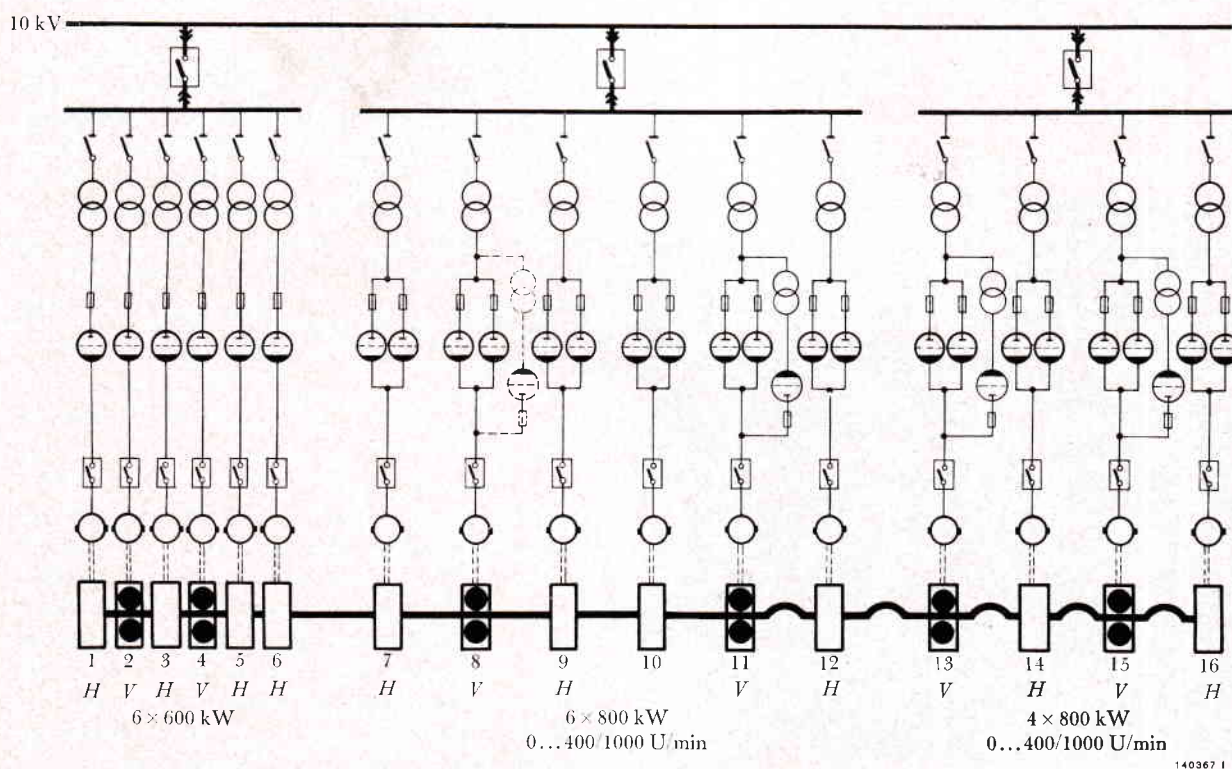


Fig. 2. — Schéma général des circuits d'alimentation des moteurs principaux

U/min = tours par minute.



Fig. 3. — Un des postes de conduite principaux avec les pupitres de commande et de surveillance du laminoir continu

pondance entre les boucles et les cages. Pour pouvoir choisir facilement ces liens de correspondance et les contrôler rapidement à chaque instant, surtout lorsqu'on doit effectuer des changements de programme, le schéma qui les représente est reproduit sur le pupitre des trains intermédiaire et finisseur.

Quelques-unes des cages verticales participent également au réglage des boucles. Or, l'expérience a montré que, pour certains programmes, la charge mécanique de ces cages est relativement faible. Aussi pourrait-il arriver que le réglage des boucles formées après ces cages ne fonctionne pas toujours correctement, si un seul sens de circulation du courant est prévu, car le freinage qui devrait se faire lorsque la charge est trop faible est alors impossible. On a donc été amené à adjoindre aux deux mutateurs alimentant en parallèle chacune des cages 11, 13 et 15, un mutateur monoanodique scellé, refroidi par air, branché en sens inverse (couplage antiparallèle, voir fig. 2). Il est ainsi possible d'inverser momentanément le courant pour réaliser un freinage. Si cela se révélait nécessaire, cette adjonction pourrait également se faire, après coup, pour la cage verticale 8.



Fig. 4. — Vue d'une partie des armoires de commande et de réglage des moteurs principaux

3. Cisailles

Le train continu comprend deux cisailles à ébouter, l'une après la dernière cage dégrossisseuse, l'autre après la dernière cage intermédiaire. Ces cisailles volantes sont entraînées par des moteurs spéciaux avec moment d'inertie particulièrement faible et capables de supporter de fortes surcharges. Ces moteurs sont alimentés par des mutateurs monoanodiques à grilles de commande refroidis par air, en couplage antiparallèle. Les ordres de coupe sont donnés par des cellules photoélectriques et le système de régulation électronique utilisé permet d'obtenir pour la coupe une précision de $\pm 2,5$ cm.



Fig. 5. — Tableau à schéma du poste de commande central

A gauche, les départs pour les moteurs du laminoir continu. A droite, les départs à haute tension.

4. Dispositif automatique de changement rapide de cages

L'équipement électrique de ce dispositif permet de remplacer l'une quelconque des cages ou toutes les cages d'une des sections. Grâce à des interrupteurs de fin de course à commande mécanique ou à commande magnétique, le processus complet de changement de cages se déroule automatiquement, en quelques minutes, dès que l'on appuie sur un bouton-poussoir du poste de conduite.

5. Refroidissoir

Une fois laminés, les profilés ou les fers ronds sont déposés sur un refroidissoir double après avoir été tronçonnés par une cisaille volante. Les longueurs des tronçons sont déterminées par une petite calculatrice numérique spéciale de manière que le refroidissoir soit pleinement utilisé et qu'il n'y ait pas de chutes trop importantes ou gênantes. Les informations données par la calculatrice sont transmises au dispositif de commande de la cisaille qui provoque les manœuvres nécessaires.

Pour des raisons d'uniformité du matériel, on a adopté pour la cisaille du refroidissoir le même type de moteur que pour les cisailles à ébouter, alimenté également par l'intermédiaire de mutateurs monoanodiques en couplage antiparallèle. La régulation électronique

permet d'obtenir les longueurs voulues avec une précision de $\pm 2,5$ cm.

Tous les appareils de commande et de surveillance du refroidissoir sont disposés sur un pupitre séparé qui a été placé au-dessus du transporteur à rouleaux amenant les laminés au refroidissoir et dont la vitesse est réglée par variation de la fréquence du courant d'alimentation des moteurs.

6. Disposition de l'équipement électrique

Tandis que les moteurs principaux sont installés dans le hall de laminage, au voisinage des cages, les armoires contenant l'appareillage de commande et de réglage, les mutateurs et les tableaux à haute et à basse tension se trouvent dans un poste électrique (fig. 4). Toutes les manœuvres relatives à l'installation de répartition à haute et à basse tension peuvent être télécommandées d'un poste de commande central (fig. 5).

Les moteurs principaux sont refroidis par circulation d'air en circuit fermé (un circuit pour chaque section). Un autre circuit fermé de ventilation assure le refroidissement des mutateurs; de l'air rafraîchi est en outre envoyé dans les autres locaux du poste électrique. En raison des températures élevées de l'été, le poste central de commande, dans lequel se trouve toujours au moins une personne, a été équipé d'une installation de climatisation.

(P.H.)

ROLF D. LAUTENSCHLAGER



Editeur: Société Anonyme Brown, Boveri & Cie, Baden (Suisse). Imprimé par Kreis & Cie S.A. à Bâle
Distributeur pour la France: Cie Electro-Mécanique, 12, rue Portalis, Paris (8e)